Heikki Lehto • Raimo Havukainen • Jukka Maalampi • Janna Leskinen

FYSIIKKA 6

Sähkö

Sanoma Pro Oy • Helsinki

Tiedustelut
Sanoma Pro Oy, Helsinki
puh. 020 391 000
sähköposti: asiakaspalvelu@sanomapro.fi

www.sanomapro.fi

Kustantaja: Sanoma Pro Oy

Tämä aineisto on digitaalinen rinnakkaisversio tuotteesta
ISBN 978-952-63-0121-1 Fysiikka 6

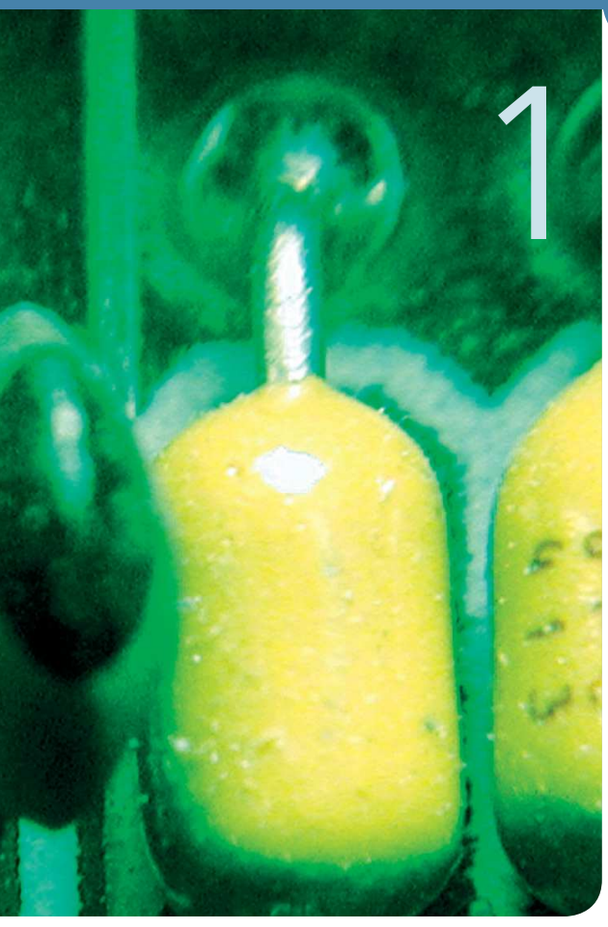
12 kk lisenssi ISBN 978-952-63-2356-5
48 kk lisenssi ISBN 978-952-63-2357-2

Toimitus: Juho Niemelä, Sanna Mäkitalo
Typografia: Riitta Piuva
Taitto: MacSet Oy / Tarja Lamberg
Kansi: Heli Ahola, Riitta Piuva
Kannen kuva: iStockphoto
Piirrokset: Eila Sinivuori, Picman Oy / Pekka Könönen
Valokuvat: ks. s. 183

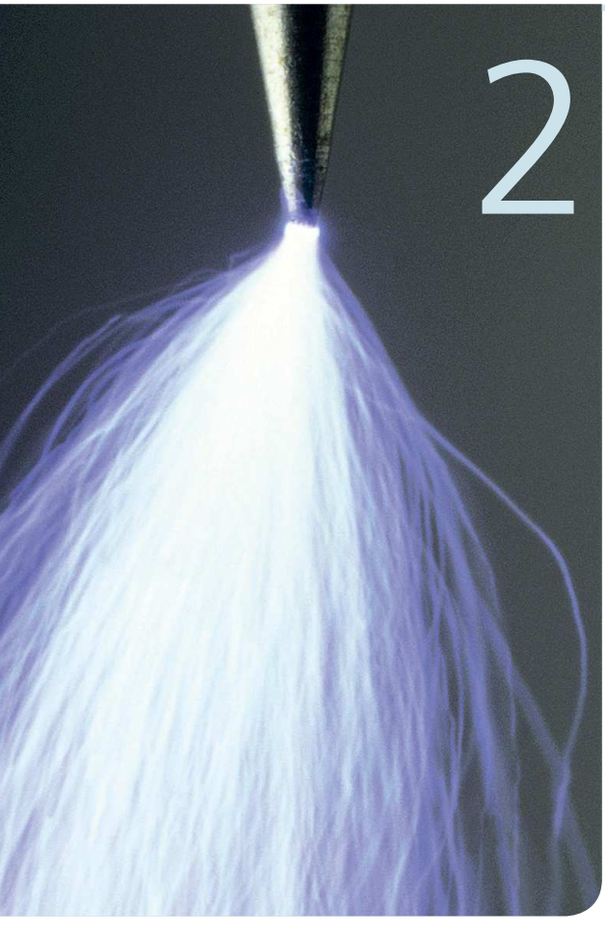
© Heikki Lehto, Raimo Havukainen, Jukka Maalampi, Janna Leskinen ja
Sanoma Pro Oy

Kopiointiehdot
Tämä teos on digitaalinen oppikirja,
joka on suojattu tekijänoikeuslailla (404/61).

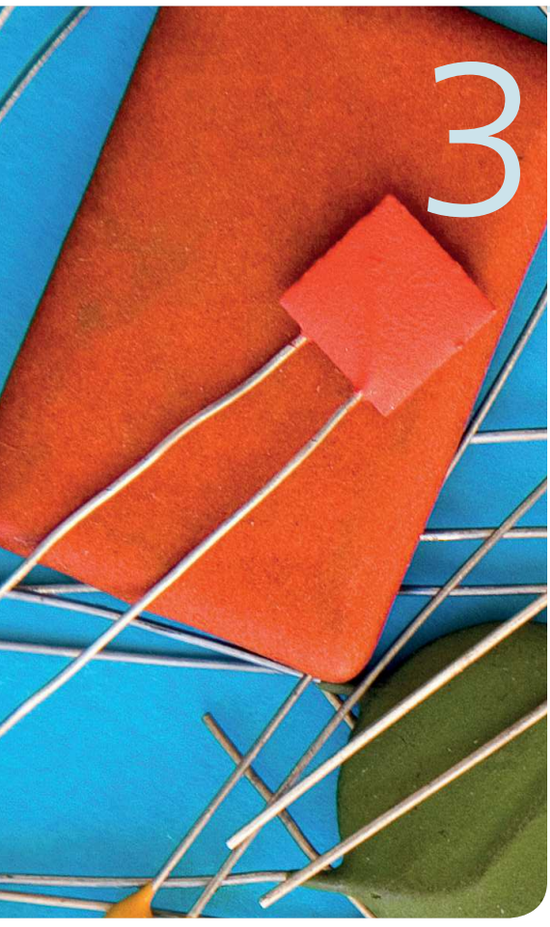
Sisällys



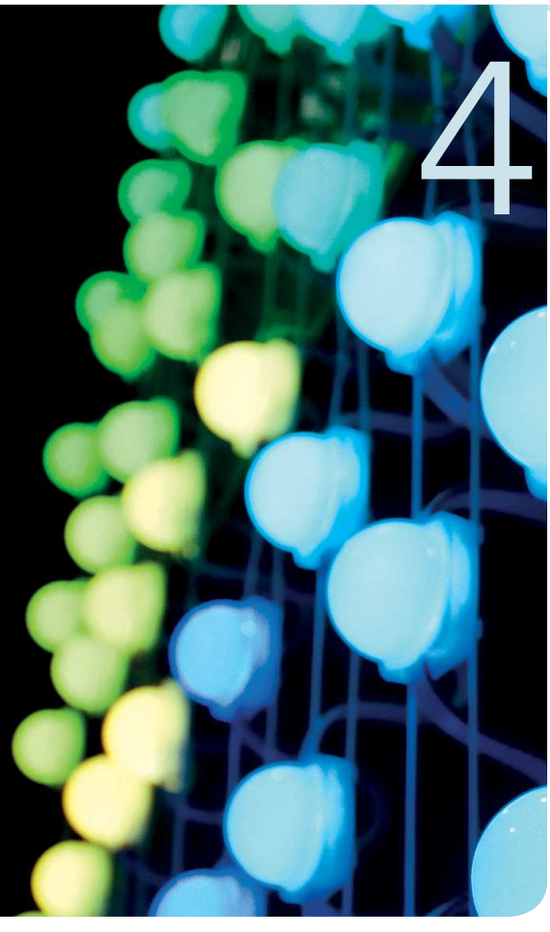
Tasavirta 7
Sähkön historiaa 8
1.1 Sähkövirta 10
Sähkövirran ominaisuudet 10
Sähkövirran mittaaminen 14
Sähkövirran mikromalli 16
1.2 Jännite 19
Jännitteen mittaaminen 21
1.3 Ohmin laki ja resistanssi 24
Ohmin laki 24
Potentiaali ja jännitehäviö 30
Resistiivisyys 36
Lämpötilan vaikutus resistanssiin 39
1.4 Vastusten kytkennät 43
Sarjakytkentä 43
Rinnankytkentä 45
1.5 Joulen laki 51
1.6 Paristot 56
Pariston napajännite 56
Paristojen sarja- ja rinnankytkentä 62
1.7 Tasavirtapiirien laskennallinen hallinta 67



Sähköstatiikka 75
Sähköä ympärillämme 76
2.1 Sähkövaraus 77
2.2 Coulombin laki 82
2.3 Sähkökenttä 88
Sähkökentän kenttäviivat 89
Pistevarauksen sähkökenttä 92
2.4 Homogeeninen sähkökenttä 99
Potentiaali ja jännite 99
Potentiaalienergia 100
Varattu hiukkanen homogeenisessa sähkökentässä 109
Mekaanisen energian säilymislaki sähkökentässä 112
2.5 Aine sähkökentässä 118
Johde sähkökentässä 118
Eriste sähkökentässä 121



Kondensaattori 127
Kondensaattori 128
3.1 Kapasitanssi 129
3.2 Levykondensaattori 134
3.3 Kondensaattorin energia 140
3.4 Kondensaattorien kytkennät 144
Kondensaattorien rinnankytkentä 144
Kondensaattorien sarjakytkentä 145



Puolijohteet 153
Puolijohteet elektroniikan perustana 154
4.1 Puolijohteet ja puolijohdekomponentit 155
Diodi 156
4.2 p- ja n-tyypin puolijohteet 160
pn-puolijohdeliitos 162
pn-liitos ulkoiseen jännitteeseen kytkettynä 163
Diodi ja valo 164
Energiavyöt 165
Transistori 167

Kertaustehtävät 171
Vastauksia 178
Hakemisto 182

Opettajalle ja opiskelijalle

Fysiikka 6 -kirja sisältää lukiofysiikan kuudennen kurssin Sähkö oppiaineksen. Kirjan taustalla on pitkä kehitystyö sekä opettajilta saadut toiveet ja palauteet.

Kirjassa on selkeä ja havainnollinen esitystapa sekä moderni ja rauhallinen ulkoasu, joka houkuttelee tutkimaan kirjaa. Uuteen asiaan tutustutaan teoriatekstien, oppilastöiden ja esimerkkien sekä valokuvien, piirrosten ja kaavioiden avulla. Kirjan rakenne sallii eriyttämisen opettajan asettamien tavoitteiden mukaan.

Fysiikka 6 -kirja käsittelee sähköön liittyviä ilmiöitä, joissa kokeet ja teoria liittyvät läheisesti yhteen. Kirjassa on yksinkertaisin välinein toteutettavia oppilastöitä ja tietokoneavusteisia mittauksia. Tietokoneavusteiset mittaukset on esitelty niin, että työn toteutus käy selville, vaikka koulussa ei olisikaan käytettävissä tietokoneavusteista mittausjärjestelmää.

Fysiikan historian opiskelu auttaa ymmärtämään, miten fysiikan teoriat rakentuvat aikaisemman tiedon pohjalle ja miten ne ovat syntyneet lukuisten eri aikakausina työskennelleiden ihmisten ponnistelujen tuloksena. Tässä kirjassa fysiikan historiallinen tausta otetaan esille asiayhteydessään.

Kirjassa on runsaasti erityyppisiä tehtäviä: ajatuksia herättäviä **pohdi ja etsi** -tehtäviä, **perinteisiä laskutehtäviä**, opiskelijan itsearviointiin tarkoitettuja **testaa, osaatko** -tehtäviä sekä **kertaustehtäviä** kirjan lopussa. Kaikkia tehtäviä ei ole tarkoitus käsitellä oppitunneilla, vaan opiskelijan on hyvä edistää oppimistaan ratkaisemalla tehtäviä myös omatoimisesti. Tehtävien ratkaisut tulee opetella esittämään selkeästi ja perustellusti.

Opetussuunnitelman edellyttämät aihekokonaisuudet, kuten hyvinvointi ja turvallisuus sekä teknologia ja yhteiskunta, ovat kirjassa luontevasti mukana. Tieto- ja viestintätekniikkaan voidaan perehtyä hyvin pohdi ja etsi -tehtävien avulla. Myös työraporttien ja tutkielmien laadintaa on hyvä harjoitella tälläkin kurssilla.

Kirjaan liittyy runsaasti monipuolista oheismateriaalia.

Jatko-opintoja ajatellen fysiikan opiskelu lukiossa on tärkeää. Monet jatko-opiskelumahdollisuudet luonnontieteiden, lääketieteen, tekniikan, koulutuksen, tutkimuksen ja usein myös liike-elämän aloilla edellyttävät fysiikan opintoja jatkossa.

Menestystä fysiikan opiskeluun!

Tammikuussa 2011

Heikki Lehto, Raimo Havukainen,
Jukka Maalampi ja Janna Leskinen

Johdantotehtäviä

1. Miksi kotien valaistuksessa hehkulamput halutaan korvata energiansäästölampuilla tai led-valaisimilla?

2. Kuinka suuri jännite on
a) taskulampun paristossa
b) palovaroittimen paristossa
c) auton akussa?

3. Sähkövirta lakkaa kulkemasta, kun sähköjohto katkeaa. Miksi kotisi kaikki lamput eivät sammu, vaikka yhden lampun hehkulanka katkeaa ja lamppu sammuu?

4. a) Auton takalasin pinnassa on vastuslankoja. Miksi lasin pintaan muodostunut jää sulaa langan kohdalta, kun sähkövirta kytketään päälle?
b) Näet salamaniskun ukonilman aikana. Mitä salaman iskiessä tapahtuu?

5. Monet laskimet ja pienitehoiset laitteet toimivat valokennolla. Mistä näiden laitteiden tarvitsema energia on peräisin?

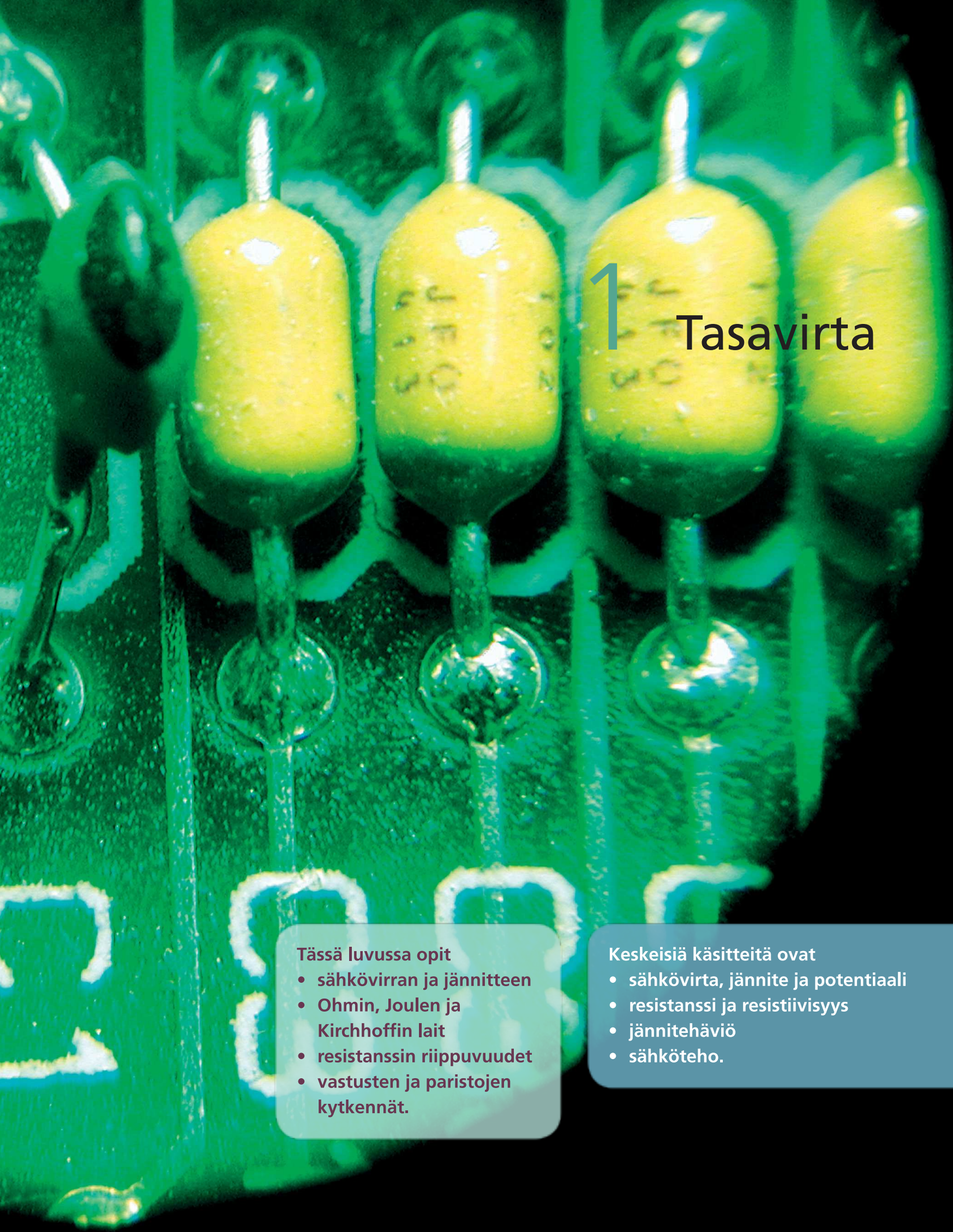
6. a) Mainitse aineita, jotka johtavat 1) hyvin 2) huonosti sähköä.
b) Miksi sähköjohtimet pinnoitetaan sähköä hyvin eristävällä aineella?

7. Kampaat kuivia ja vastapestyjä hiuksia. Miksi kampa ja osa hiuksistasi vetävät toisiaan puoleensa?

8. a) Miksi naulakosta tai muovituolista voi saada pienen sähköiskun?
b) Mistä kameran salamalaitteen valo on peräisin?

9. a) Taskulamppu voi toimia yhdellä paristolla. Miten taskulampun valaisuun vaikuttaa se, että taskulampun sisälle laitetaan useita paristoja peräkkäin?
b) Mikä vuorovaikutuslaji pitää yhteensopivat molekyylit paikoillaan DNA-molekyylin rakenteessa?

10. a) Mitä tarkoitetaan tasavirralla ja vaihtovirralla?
b) Kuvaile, millaiset olosuhteet suomalaisessa kodissa oli 150 vuotta sitten, kun sähkölaitteita ei ollut käytettävissä.



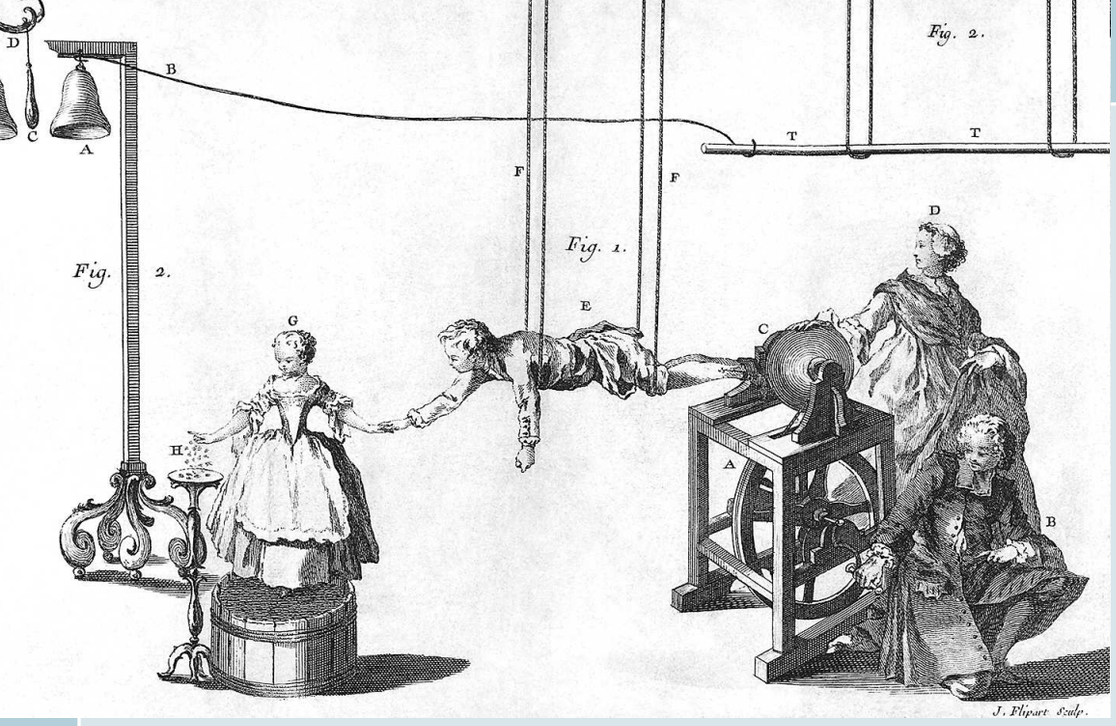
1 Tasavirta

Tässä luvussa opit

- **sähkövirran ja jännitteen**
- **Ohmin, Joulen ja Kirchhoffin lait**
- **resistanssin riippuvuudet**
- **vastusten ja paristojen kytkennät.**

Keskeisiä käsitteitä ovat

- **sähkövirta, jännite ja potentiaali**
- **resistanssi ja resistiivisyys**
- **jännitehäviö**
- **sähköteho.**



Eristävien silkkinauhojen varaan ripustettu mies varataan hankaussähköllä. Neitokin varautuu samalla, ja pienet paperipalat nousevat pöydältä neidon käteen.

Henkilökohtainen ukkosenjohdatin, Pariisi 1870-luku.

Sähkön historiaa

Sähköisiä ilmiöitä käsittelevät vanhimmat kirjalliset dokumentit ovat antiikin Kreikasta. Kreikkalaiset tiedemiehet, mm. *Thales* (640–560 eKr.), havaitsivat, että hangattu meripihka (kreik. *elektron*) vetää puoleensa esineitä, kuten villaa ja olkia.

Sähköisten veto- ja hylkimisvoimien tarkempi tutkiminen alkoi 1700-luvulla. *Benjamin Franklin* (1706–1790) esitti vuonna 1747 sähköisten ilmiöiden selittyvän sillä, että kappaleissa on sähkön ylimäärä tai vajaus. Franklinin mielenkiinto kohdistui terävien johdekappaleiden kykyyn vetää lähellä olevasta varatusta kappaleesta sähkövarauksia itseensä. Hän toi sähköfysiikkaan positiivisen ja negatiivisen varauksen käsitteet.

Charles Augustin Coulomb (1736–1806) mittasi pienten varattujen pallojen välisiä veto- ja hylkimisvoimia. Vuonna 1784 hän julkaisi tutkimuksensa, jonka mukaan varattujen kappaleiden välinen voima on suoraan verrannollinen sähkövarauksiin ja kääntäen verrannollinen varautuneiden kappaleiden keskipisteiden välisen etäisyyden neliöön. Gravitaatiovakion määrittäjänä tunnettu englantilainen fyysikko ja kemisti *Henry Cavendish* (1731–1810) oli keksinyt tämän Coulombin lakina tunnetun lain jo ennen Coulombia, mutta hän ei koskaan julkaissut tutkimustuloksiaan.

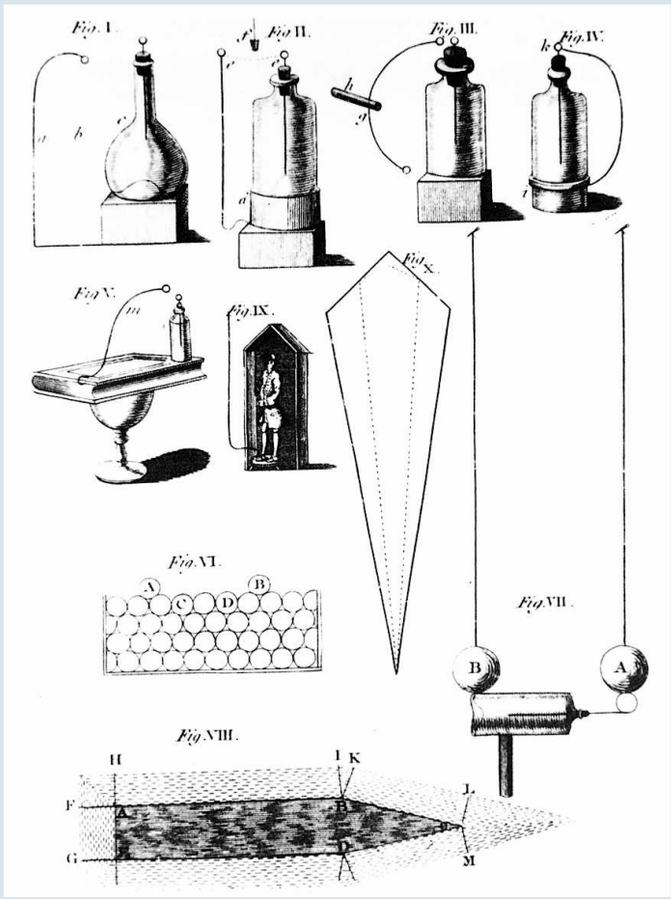
Italialainen anatomian professori *Luigi Galvani* (1737–1798) huomasi sammakonraajakokeissaan, että irti leikattu sammakon reisi liikahti, kun sähkökipinä osui siihen. Reisi liikahti myös, kun reisilihasta koskettettiin kahdella toisiinsa liitetyllä eri aineista valmistetulla metallilangalla. Sammakon jalka ja metallilangat muodostivat galvaanisen parin.

Ensimmäisen sähkökemiallisen pariston rakensi italialainen fyysikko *Alessandro Guiseppe Antonio Anastasio Volta* (1745–1827). Vuonna 1800 julkaistu keksintö koostui päällekkäin asetetuista sinkki- ja hopealevyistä. Levyjen väleissä oli paperiliuskoja, jotka oli kostutettu suolavedessä.

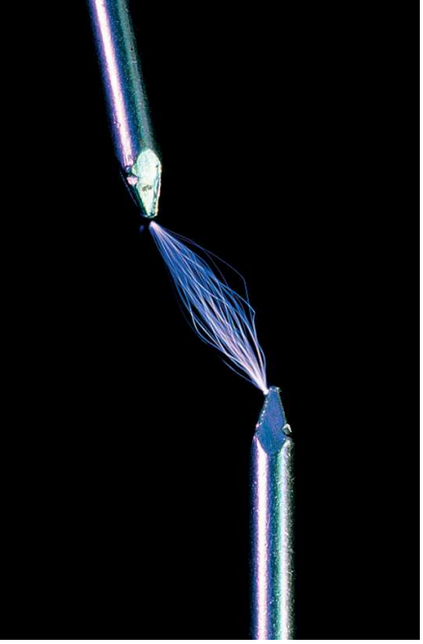
Sähköankeriasta ja -rauskua käytettiin mm. reuman hoitoon. Kalan päällä seistiin rantavedessä, kunnes jalat muuttuivat lähes tunnottomiksi. Tämän uskottiin lievittävän reumaattisia kipuja.

Ranskalainen fyysikko ja matemaatikko *André Marie Ampère* (1775–1836) osoitti, että kun sähkövirta kulkee johtimissa, niiden välillä on voimavaikutus. Tämän voiman avulla määritellään nykyisin sähkövirran yksikkö 1 A (ampeeri). Hänen tutkimuksensa osoitti entistä selkeämmin sähkön ja magnetismin välisen yhteyden.

Englantilainen fyysikko *Joseph John Thomson* (1856–1940) löysi elektronin vuonna 1897. Tutkiessaan katodisäteitä hän totesi, että niiden liikkeeseen vaikutti sähkökenttä. Hän päätteli, että säteet ovat pieniä varattuja hiukkasia eivätkä aaltoja. Protonin (kreik. *protos* 'ensimmäinen') löysi englantilainen fyysikko *Ernest Rutherford* (1871–1937) pommittaessaan protoneja α-hiukkasilla typpiatomien tutkimustyön yhteydessä.



Franklinin tutkimusvälineistöön kuuluivat mm. Leidenin pullot, metallitangolla varustettu koppi sekä leija.



Sähköisku on hetkellinen kehon läpi kulkeva sähkövirta. Hankaussähköstä johtuvat sähköiskut ovat hyvin lyhytaikaisia sähköpurkauksia ja siksi yleensä vaarattomia. Sähköiskuissa ampeeri on valtavan suuri yksikkö, sillä jo 50 mA:n sähkövirta kehossa on hengenvaarallinen ihmiselle.

1.1 Sähkövirta

Sähköä tarvitaan niin lämmityksessä kuin viestinnässä ja viihteessäkin. Esimerkiksi viihde-elektroniikan laitteet tarvitsevat toimiakseen sähköä. Sähkölaitteissa on aina virtapiiri. Sähköpiirroksissa ja usein myös sähkölaitteissa käytetään sovittuja piirrosmerkkejä. Piirrosmerkkien avulla esitettyä kytkentää sanotaan **kytkentäkaavioksi**.

tasajännite
vaihtojännite
maadoitus
kytkin
tasajännitelähde
paristo, akku
ampeerimittari
volttimittari
lamppu
vastus
säätövastus
säätövastus
kondensaattori
säätökondensaattori
puolijohdediodi

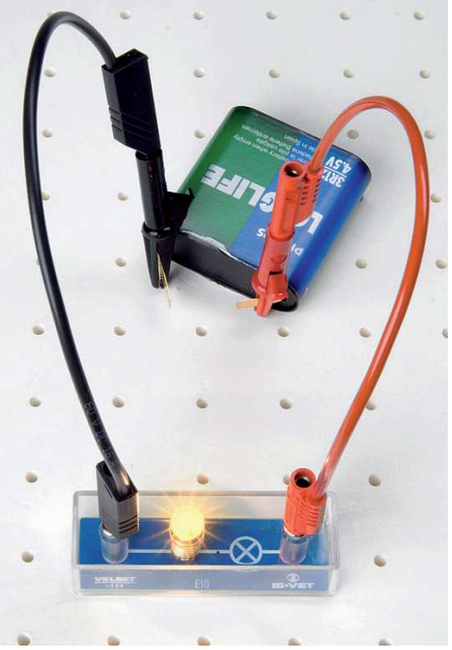
Sähkövirran ominaisuudet

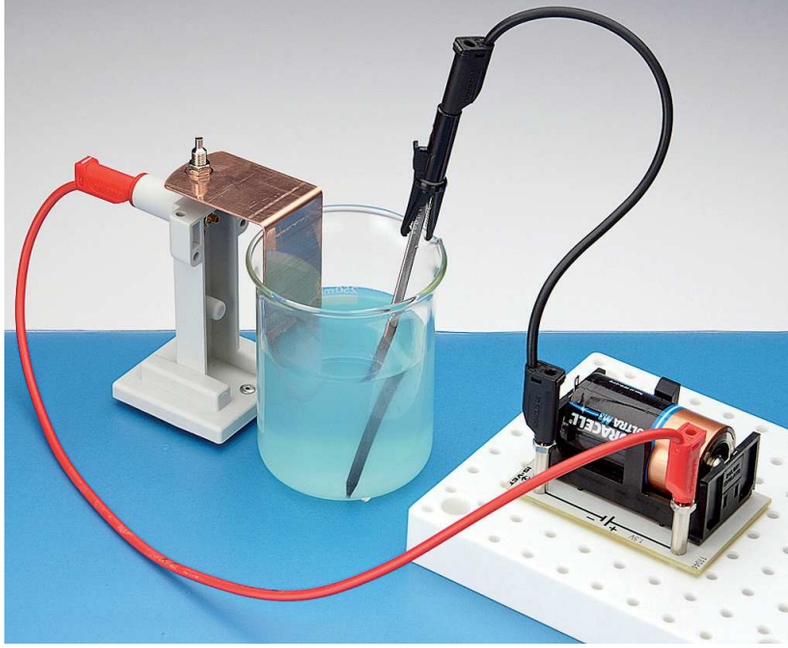
Oppilastyö ▪ Sähkövirran vaikutukset

1. Liitä lamppu johtimilla paristoon siten, että syntyy suljettu virtapiiri. Mitä havaitset? Anna lampun palaa hetki. Kokeile lamppua kädelläsi. Mitä havaitset nyt?

2. Yhdistä pariston navat sähköjohtimella siten, että johdin on kompassineulan suuntainen. Oikosulje paristo hetkeksi. Tarkkaile kompassineulaa.

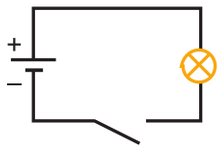
3. Kytke sähköjohtimen avulla naula pariston miinusnapaan ja kuparilevy plusnapaan. Aseta naula ja kuparilevy kuparisulfaattiliuokseen. Tarkkaile naulan pintaa.





Oppilastyössä paristo ja siihen kytketty lamppu muodostavat **virtapiirin**. Lampun navat yhdistettiin johtimilla pariston napoihin, joita sanotaan plus- (+) ja miinusnavoiksi (−). Paristo on jännitelähde, jossa kemialliset reaktiot synnyttävät napojen välille jännitteen. Pariston piirrosmerkissä pidempi viiva tarkoittaa plusnapaa ja lyhyempi miinusnapaa. Virtapiiri **suljetaan**, kun siinä kulkee sähkövirta. Kun virtapiiri **avataan** (esimerkiksi toinen johdin irrotetaan paristosta), siinä ei kulje sähkövirtaa.

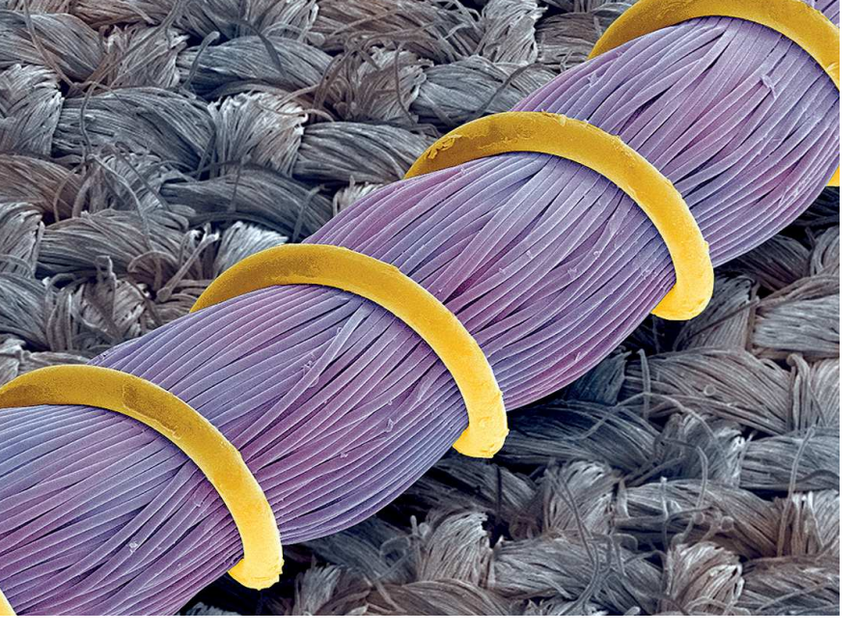
Suljettu virtapiiri.



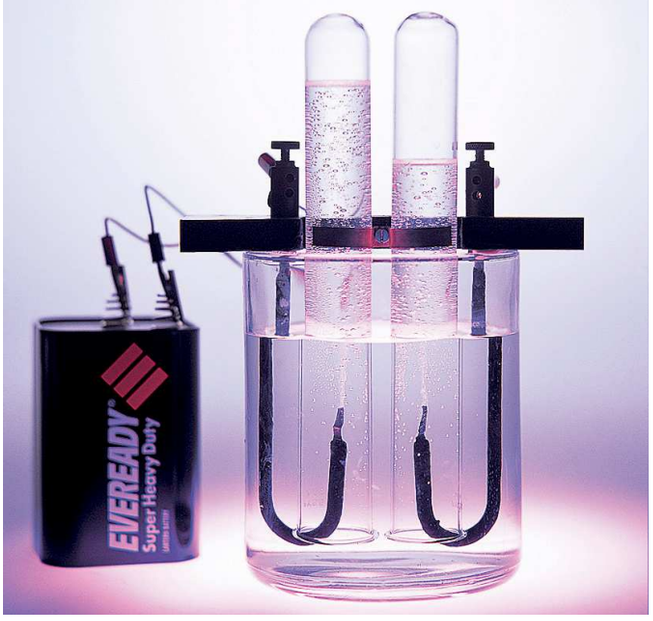
Avoin virtapiiri.

Suljettu ja avoin virtapiiri
Virtapiiri on suljettu, kun siinä oleva jännitelähde ylläpitää sähkövirtaa.
Virtapiiri on avoin, kun siinä ei kulje sähkövirtaa.

Sähkövirta havaitaan usein sen vaikutusten perusteella. Oppilastyössä lampun valaiseminen osoitti sähkövirran kulun: sähkövirta voi kulkea vain suljetussa virtapiirissä. Sähkövirta sai hehkulampun hehkulangan kuumenemaan säteileväksi. Jos virtapiirissä kulkeva sähkövirta on pieni**, säteilyä** ei välttämättä havaita. Virran kulku voidaan silloin tarvittaessa varmistaa esimerkiksi ampeerimittarilla.



Mikroskooppikuva lämpiävän sähköpeitteen pintarakenteesta. Violetit nauhat ovat eristeellä päällystettyä johdinta, jota sähkövirran lämpövaikutus kuumentaa.



Veden elektrolyysi. Sähkövirta aiheuttaa veden hajoamisen hapeksi ja vedyksi. Nämä kaasut kerääntyvät koeputkien yläpäihin. Vetyä syntyy kaksinkertainen määrä happeen verrattuna, joten vetyä on oikeanpuoleisessa putkessa.

Lampun lämpenemisestä havaittiin myös sähkövirran **lämpövaikutus**. Sitä käytetään hyväksi esimerkiksi vedenkeittimissä ja saunan kiukaan vastuksissa. Sähkövirralla on myös **magneettinen vaikutus**, joka havaittiin kompassineulan suunnan muutoksena. Kun sähkövirta kulkee johtimessa, sen ympärille syntyy magneettikenttä, johon lähellä oleva kompassineula reagoi. Tähän palataan Sähkömagnetismi-kurssilla.

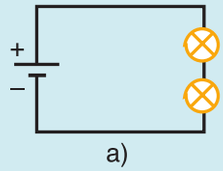
Sähkövirta aiheuttaa elektrolyyteissä kemiallisia reaktioita. Elektrolyytti on aine, joka johonkin liuottimeen liuenneena johtaa sähköä. Naulan pinnan kuparointi ja korujen kultaus ovat osoituksia sähkövirran **kemiallisesta vaikutuksesta**. Galvanointi on menetelmä, jossa kappale – esimerkiksi rautanaula – pinnoitetaan sähkökemiallisen prosessin avulla. Galvanointi sinkin avulla estää naulan ruostumisen. Sähkövirran avulla voidaan myös hajottaa vettä ja siten valmistaa happea ja vetyä.

Oppilastyö ▪ Sähkövirran suunta ja suuruus

1. Tutki sähkövirran magneettista vaikutusta samalla tavalla kuin edellisen oppilastyön kohdassa 2. Toista koe kytkemällä johtimet uudelleen, mutta tällä kertaa pariston eri napoihin. Tarkkaile kompassineulan suuntaa.

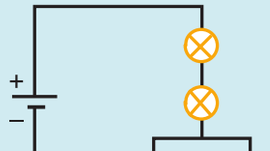
(1)

2. Tutki samanlaisten lamppujen kirkkautta erilaisissa kytkennöissä kytkemällä niitä johtimilla paristoon. Kytke ensin jokainen lamppu erikseen paristoon ja totea, että lamput palavat yhtä kirkkaasti (kytkentä 1).
a) Kytke kaksi lamppua sarjaan (peräkkäin) ja yhdistä ne johtimilla paristoon. Vertaa lamppujen kirkkautta kytkentään 1.
b) Kytke kolme lamppua sarjaan ja vertaa niiden kirkkauksia. Mitä voit todeta, kun vertaat kolmen sarjaan kytketyn lampun kirkkautta tilanteeseen, jossa paristoon oli kytketty vain yksi lamppu (kytkentä 1)?
c) Tee kytkentä, jossa kaksi lampuista on kytketty rinnan (vierekkäin). Vertaa rinnan kytkettyjen lamppujen kirkkautta muiden lamppujen kirkkauteen.



a)

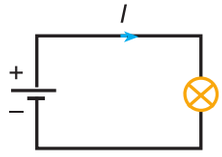
b)



c)

Kun oppilastyön kohdassa 1 vaihdettiin johtimien paikkaa paristoa oikosuljettaessa, kompassineulan suunnan kääntyminen osoitti sähkövirran suunnan muutoksen. Oppilastyön muissa kohdissa havaittiin, että lamppujen lukumäärä vaikuttaa niiden kirkkauteen. Tuloksista voidaan päätellä, että **sähkövirralla on suunta ja suuruus**.

On sovittu, että **sähkövirran suunta** virtapiirissä on jännitelähteen ulkopuolella **plusnavasta miinusnapaan**. Sähkövirta I on SI-järjestelmän perussuure. Sen yksikkö on 1 A (ampeeri).



On sovittu, että sähkövirran suunta on plusnavasta miinusnapaan.

Sähkövirta
Sähkövirran suunta virtapiirissä (jännitelähteen ulkopuolella) on plusnavasta miinusnapaan.
Sähkövirran yksikkö on 1 A (ampeeri).

Esimerkiksi metallit ja suolaliuokset johtavat hyvin sähköä. Tällaisia aineita kutsutaan johteiksi. Muun muassa posliini ja muovi ovat eristeitä, koska ne eivät johda sähköä. Puolijohteiden sähkönjohtavuutta voidaan sen sijaan muuttaa esimerkiksi valon avulla. Puolijohteisiin palataan luvussa 4.

Laite tai ilmiö	Sähkövirta
laskin	0,1–100 mA
lämminvesivaraaja	8 A
keittolevy	5–15 A
energiansiirtoverkot	0,1–10 kA
salama	20 kA

Sähkövirtaa kutsutaan **tasavirraksi** (*direct current*, DC), jos sähkövirta kulkee virtapiirissä koko ajan samaan suuntaan. Sähkövirta voi olla myös **vaihtovirtaa** (*alternating current*, AC), jolloin sähkövirran suunta vaihtuu jaksollisesti. Vaihtovirtaan palataan Sähkömagnetismi-kurssilla.

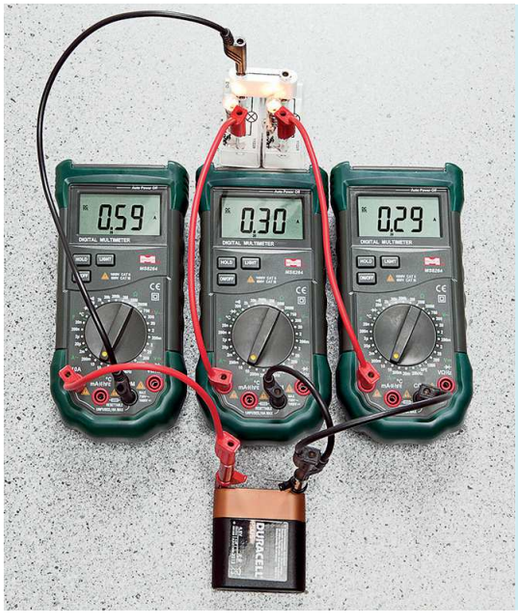
Sähkövirta on varauksisten hiukkasten liikettä. Johteissa ja kiinteissä aineissa **sähkövirta** on yleensä **elektronien liikettä**, kaasuissa myös ionien liikettä. Nesteissä sähkövirta on yleensä ionien liikettä. Huomaa, että elektronien liikesuunta on vastakkainen sovitulle sähkövirran suunnalle (ks. s. 16).

Ampeerimittarin kytkeminen.

Sähkövirran mittaaminen

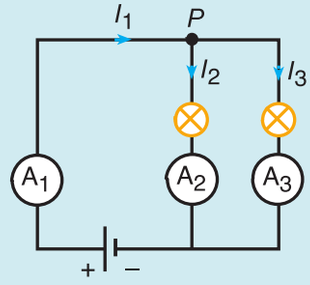
Sähkövirran mittaamiseen käytetään ampeerimittaria. Ampeerimittari kytketään aina virtapiirin osaksi siten, että **mitattava virta** kulkee **mittarin läpi** sen **plusnavasta miinusnapaan**. Nykyaikaiset ampeerimittarit ilmoittavat sähkövirran suuruuden negatiivisena, jos mittarin navat on kytketty väärinpäin. Tällaisen mittarin voi kytkeä piiriin kummin päin tahansa mittarin vaurioitumatta.

Koska ampeerimittari mittaa itsensä läpi kulkevan sähkövirran suuruuden, mittarit valmistetaan siten, että ne eivät juuri vaikuta virtapiirissä kulkevan sähkövirran suuruuteen. Ennen kuin ampeerimittari kytketään virtapiirin osaksi, valitaan mittarin laajin käyttöalue, jotta mittausalue ei ylity ja mittari ei pääsisi vaurioitumaan. Tämän jälkeen käyttöaluetta voi tarvittaessa pienentää.



Oppilastyö ▪ Kirchhoffin 1. laki

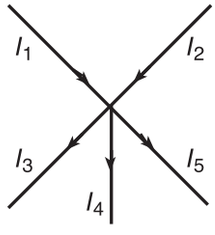
Rakenna kuvan mukainen kytkentä. Vertaa ampeerimittarin A_1 lukemaa mittareiden A_2 ja A_3 lukemien summaan. Mitä havaitset? Toista koe käyttämällä erilaisia lamppuja (vastuksia) ja erilaisia jännitelähteitä.



Oppilastyön mittaustulokset taulukoitiin.

Mittaus	I_1/A	I_2/A	I_3/A	$(I_2 + I_3)$/A
1	**0,37**	0,15	0,21	**0,36**
2	**0,060**	0,029	0,032	**0,061**
3	**0,59**	0,30	0,29	**0,59**
4	**0,053**	0,026	0,026	**0,052**
5	**0,99**	0,35	0,64	**0,99**

Jos virtapiiri ei ole haarautunut, kaikkialla piirissä kulkee sama sähkövirta. Kun virtapiiri haarautuu, myös sähkövirta jakautuu osiin. Oppilastyön tuloksista havaitaan, että mittaustarkkuuden rajoissa sähkövirtojen summa virtapiirin haaroissa on yhtä suuri kuin sähkövirta ennen haarautumaa eli $I_1 = I_2 + I_3$. Tämä tunnetaan Kirchhoffin ensimmäisenä lakina. *Gustav Kirchhoff* (1824–1887) oli saksalainen fyysikko.



$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$.

Kirchhoffin 1. laki

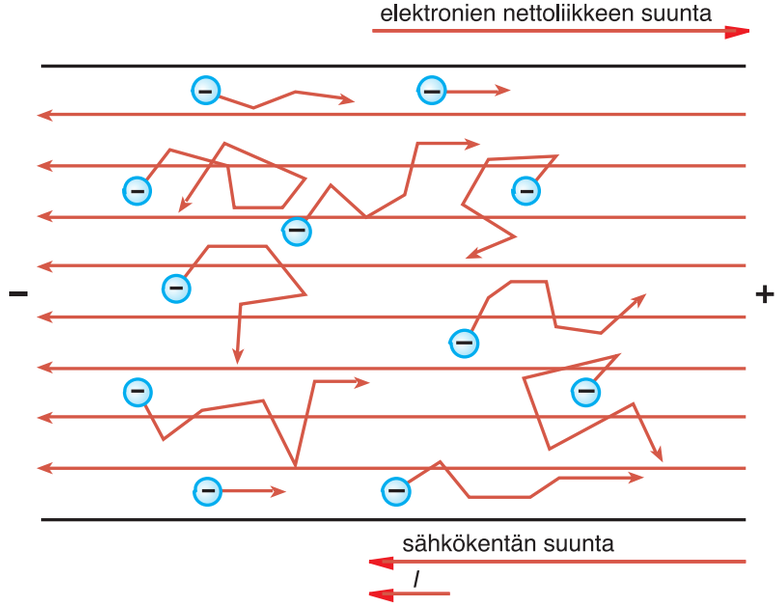
Virtapiirissä haarautumispisteeseen tulevien sähkövirtojen summa on yhtä suuri kuin haarautumispisteestä lähtevien sähkövirtojen summa.

Sähkövirran mikromalli

Sähkövirralla tarkoitetaan varattujen hiukkasten liikettä. Johteissa vapaat, varauksiset hiukkaset toimivat varauksenkuljettajina. Tyypillisiä sähkönjohteita ovat metallit ja hiili, joissa on runsaasti elektroneja, jotka eivät kuulu sidoksiin vaan voivat liikkua aineen rakenteessa. Näitä elektroneja kutsutaan vapaiksi elektroneiksi. Varaukset voivat siirtyä johteesta valmistetun johtimen välityksellä.

Metalleissa vapaat elektronit tekevät satunnaista lämpöliikettä, jolloin elektronien liike kaikkiin suuntiin on yhtä todennäköistä.

Kun metallijohdin kytketään jännitelähteeseen, johtimen sisälle syntyy sähkökenttä (ks. s. 88), jonka suunta on jännitelähteen positiivisesta kohtiosta kohti jännitelähteen negatiivista kohtiota. Sähkökentän synnyn seurauksena vapaat elektronit alkavat liikkua keskimäärin samaan suuntaan eli kohti jännitelähteen positiivista napaa. Suurin osa elektronien liikkeestä on edelleen järjestäytymätöntä lämpöliikettä, mutta liike sähkökentän suuntaan nähden vastakkaiseen suuntaan on kuitenkin hieman yleisempää. Tämä ilmenee sähkövirtana.



Elektronit törmäilevät johteessa kaiken aikaa toisiinsa ja paikallaan pysyviin positiivisiin ioneihin. Ne menettävät törmäyksissä jatkuvasti energiaa. Elektronit saavuttavat nopeasti keskimääräisen mm. johteesta riippuvan rajanopeuden, jolla ne liikkuvat.

Sähkövirta metallijohtimessa on sähkökentän aiheuttamaa elektronien liikettä. Jotta saadaan aikaan jatkuva sähkövirta, johtimen päiden välille tarvitaan pysyvä jännite.

Sähkövirran voimakkuudella tarkoitetaan johtimessa sen poikkipinnan läpi aikayksikössä siirtyneen varauksen suuruutta.

Sähkövirta
Sähkövirta metallijohtimessa on sähkökentän aiheuttamaa elektronien liikettä.
Johtimessa kulkeva sähkövirta on

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t},$$

jossa ΔQ on ajassa Δt johtimen poikkipinnan läpi siirtyneen varauksen suuruus.

Sähkövirran yksikkö on $[I] = \frac{[Q]}{[t]} = \frac{1\ \text{C}}{1\ \text{s}} = 1\ \text{A}$ (ampeeri).

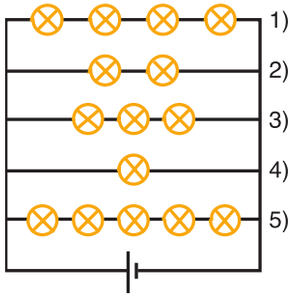
Sähkövirran suunnaksi on sovittu positiivisen varauksen suunta eli suunta jännitelähteen positiivisesta kohtiosta negatiiviseen kohtioon. Sopimus tehtiin ennen kuin elektroni oli löydetty. ”Virheellisellä” suuntasopimuksella ei ole merkitystä virtapiirien tutkimuksissa.

Johtimen poikkipinnan läpi kulkeneen sähkövarauksen määrä ajassa Δt on $\Delta Q = I\Delta t$. Tästä saadaan sähkövaraukselle yksikkö $[Q] = [I][t] = 1\ \text{A} \cdot 1\ \text{s} = 1\ \text{As} = 1\ \text{C}$ (coulombi). Akkujen varaukset ilmoitetaan tavallisesti ampeeritunteina tai milliampeeritunteina: 1 ampeeritunti = 1 Ah = 3600 As = 3600 C.

Kuvan akun maksimivaraus on 150 mAh.

Pohdi ja etsi

1-1. Kuvan lamput ovat samanlaiset. Laita johtimet järjestykseen niissä kulkevan sähkövirran suuruuden mukaan.



1-2. a) Mikä on sulake, ja mihin sitä tarvitaan?
b) Mihin sulakkeen toiminta perustuu?
c) Selvitä sulakkeen rakenne.
d) Automaattisulakkeet ovat syrjäyttämässä perinteiset sulakkeet. Miten automaattisulake toimii?

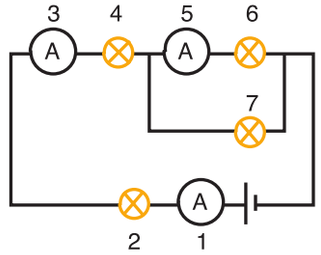
1-3. Luettele kodin laitteita, joiden toiminnan perustana on sähkövirran
a) lämpövaikutus b) säteilyvaikutus
c) magneettinen vaikutus
d) kemiallinen vaikutus.

1-4. a) Esittele lyhyesti sähkövirran vaikutuksia.
b) Mihin sähkövirran vaikutukseen perustuvat akun lataaminen ja polttimon palaminen?

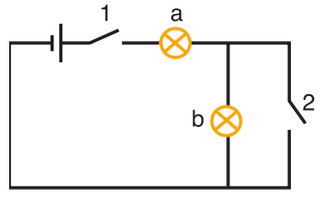
1-5. Mitä voi päätellä kuvan perusteella ampeerimittarin paikan merkityksestä haarautumattomassa virtapiirissä?

1-6. Jos sähkövirran voimakkuus on n. 10 mA, se voi aiheuttaa ihmiselle lihaskouristuksia.
a) Miksi liian suuri sähkövirta on ihmiselle vaarallista?
b) Millä tavoin sähkövirtaa käytetään lääketieteellisenä hoitokeinona?

1-7. Seuraavat väitteet liittyvät alla olevaan kytkentäkaavioon. Kaikki piirissä olevat lamput ovat keskenään samanlaisia. Mitkä väitteistä ovat tosia?
a) Mittarit 1 ja 3 näyttävät samaa lukemaa.
b) Mittarit 3 ja 5 näyttävät samaa lukemaa.
c) Lamppu 2 syttyy hieman ennen muita.
d) Lamppu 2 palaa hieman kirkkaammin kuin lamppu 4.
e) Lamput 2 ja 4 palavat yhtä kirkkaasti.
f) Lamput 6 ja 7 palavat yhtä kirkkaasti.
g) Sähkövirran kulkusuunta on kuvan kytkentäkaaviossa myötäpäivään.
h) Elektronien liikesuunta johtimissa on kytkentäkaaviossa myötäpäivään.



1-8. Oheisessa virtapiirissä on kaksi kytkintä ja kaksi samanlaista lamppua. Kuvaile, mitä piirissä tapahtuu, kun
a) kytkin 1 suljetaan
b) kytkin 2 suljetaan kytkimen 1 sulkemisen jälkeen.
Kiinnitä erityistä huomiota lamppujen palamiskirkkauteen.



Sähköpari on komponentti, jossa tapahtuvat kemialliset reaktiot synnyttävät jännitteen sen napojen väliin. Monen sähköparin yhdistelmiä kutsutaan usein paristoiksi.

1.2 Jännite

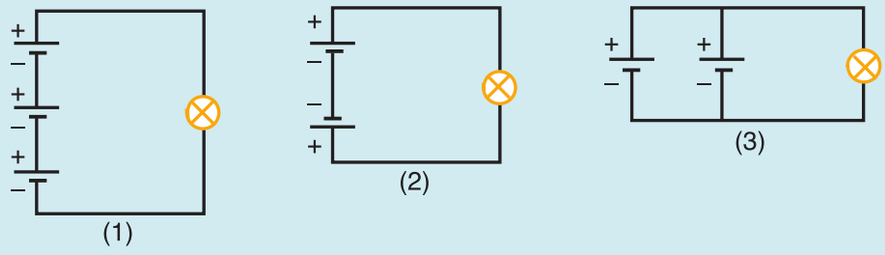
Kytkentä 2.

Oppilastyö ▪ Jännite

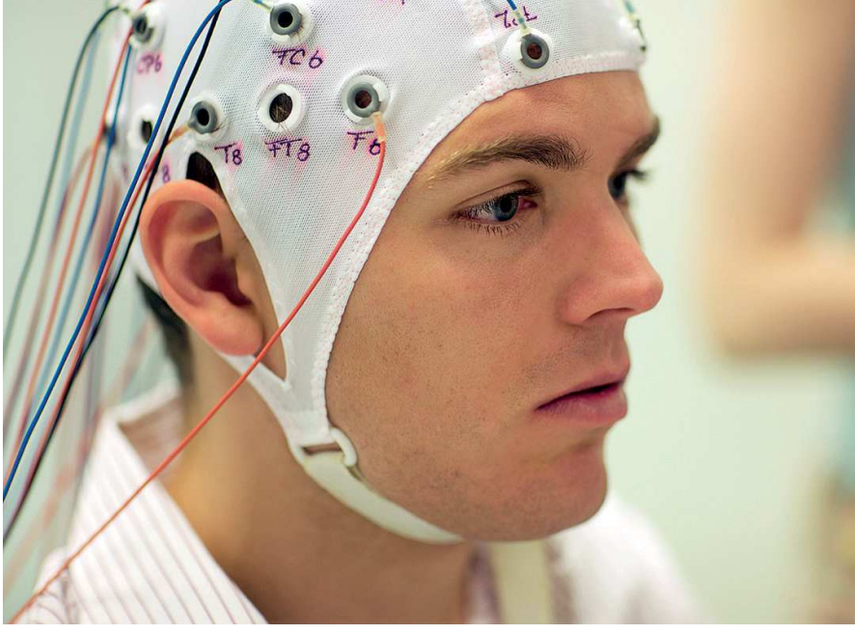
1. Kytke yksi lamppu paristoon. Tarkkaile lampun kirkkautta. Kytke paristot sarjaan eli lisää kytkentään yksitellen samanlaisia paristoja yhdistämällä paristojen erimerkkiset navat toisiinsa (kytkentä 1). Miten paristojen lisäys vaikuttaa lampun kirkkauteen?

2. Tee kuvan mukainen kytkentä 2. Käytä samanlaisia paristoja. Mitä voit todeta lampusta?

3. Kytke kaksi paristoa rinnan eli yhdistä paristojen samannimiset navat (kytkentä 3) ja lisää kytkentään lamppu. Lisää paristoja yksi kerrallaan rinnankytkentään. Muuttuuko lampun kirkkaus?



Paristolla on kyky saada aikaan sähkövirta suljetussa virtapiirissä. Pariston virrankehittämiskyvyn voimakkuutta sanotaan lähdejännitteeksi.



Ihmisen kehon toimintaan liittyy runsaasti sähköisiä toimintoja, kuten sydämen toimintaa ohjaavat sähköpulssit. Myös viestit kulkevat hermosoluissa signaaleina, jotka etenevät solukalvojen sisä- ja ulkopinnan välisen jännitteen pulsseina. Sydämen toimintaa kuvaa mm. sydänsähkökäyrä (EKG, elektrokardiogrammi). Aivoja tutkitaan esimerkiksi aivosähkökäyrän (EEG, elektroenkefalografia) avulla.

Paristolla on ominaisuus, joka määrää sen kyvyn synnyttää sähkövirtaa, ja virtapiirien toiminta määräytyy mm. pariston synnyttämästä sähkövirrasta. Pariston aikaansaama sähkövirran suuruus riippuu virtapiirissä olevista komponenteista.

Jännitelähteessä, kuten paristossa, napojen välillä on **jännite**. SI-järjestelmässä jännitteen tunnus on *U* ja yksikkö 1 V (voltti). Jännitelähteen miinusnavassa on ylimäärä elektroneja ja plusnavassa puolestaan on elektronien vajaus. Kuormittamattoman jännitelähteen jännitettä nimitetään **lähdejännitteeksi**. Se syntyy paristossa tapahtuvien kemiallisten reaktioiden seurauksena. Lähdejännite aiheuttaa suljetussa virtapiirissä sähkövirran. Kuormitetun jännitelähteen jännitettä nimitetään **napajännitteeksi**. Paristosta saatava jännite on **tasajännitettä**. Kun volttimittari kytketään virtapiirissä olevan laitteen, kuten lampun, napoihin, saadaan mitattua laitteen virtapiirissä aiheuttama **jännitehäviö**. Jännitehäviöllä tarkoitetaan siis suljetussa virtapiirissä olevan laitteen **napojen välistä jännitettä**.

Edellä tehtyjen oppilastöiden perusteella voidaan todeta, että niin paristot kuin lamputkin vaikuttavat suljetussa virtapiirissä kulkevan sähkövirran suuruuteen.

Jännite liittyy sekä paristoon että jokaiseen virtapiirissä olevaan komponenttiin, kuten lamppuun. Jotta virtapiirissä kulkisi sähkövirta, virtapiirissä on oltava **jännitelähde**, esimerkiksi paristo. Virtapiirejä voidaan rakentaa yhdistämällä jännitelähteeseen johtimilla erilaisia sähkölaitteita tai komponentteja.

Oppilastyön ensimmäisessä kohdassa todettiin, että kun useampia paristoja kytkettiin peräkkäin samoin päin, lamppu paloi selvästi kirkkaammin kuin yhtä paristoa käytettäessä. Kun paristojen erimerkkiset navat yhdistetään toisiinsa eli paristot kytketään sarjaan, jännite kasvaa. Paristot kumoavat toistensa vaikutuksen vastakkain sarjaan kytkettäessä, jos niiden jännitteet ovat yhtä suuret. Siksi oppilastyön kohdassa 2 lamppu ei palanut lainkaan. Kun paristoja kytkettiin rinnan, lampun kirkkaus ei silmämääräisesti juurikaan muuttunut paristojen lukumäärästä riippumatta. Ampeerimittarilla voitaisiin kuitenkin havaita pieni virran kasvu. Tähän palataan tarkemmin luvussa 1.6.

Jännite
Jännitelähde synnyttää suljettuun virtapiiriin sähkövirran.
Kuormittamattoman jännitelähteen jännitettä nimitetään lähdejännitteeksi.
Kuormitetun jännitelähteen jännitettä nimitetään napajännitteeksi.
Virtapiirissä jokainen komponentti aiheuttaa jännitehäviön.
Jännitteen yksikkö on 1 V (voltti).

Jännitteen mittaaminen

Jännitteen mittaamisessa käytetään volttimittaria. Volttimittari kytketään mitattavan kohteen, kuten pariston tai lampun, rinnalle siten, että volttimittarin **plusnapa** yhdistetään pariston **plusnapaan** ja **miinusnapa miinusnapaan**. Volttimittari on valmistettu niin, että sen läpi kulkee mahdollisimman pieni sähkövirta. Mittari ei siis oleellisesti muuta virtapiirissä kulkevan sähkövirran suuruutta. Volttimittarissa on erilaisia mittausalueita: aluksi on järkevää valita mittarin laajin käyttöalue ja sitten tarvittaessa pienentää sitä.

Oppilastyö ▪ Voltan pari

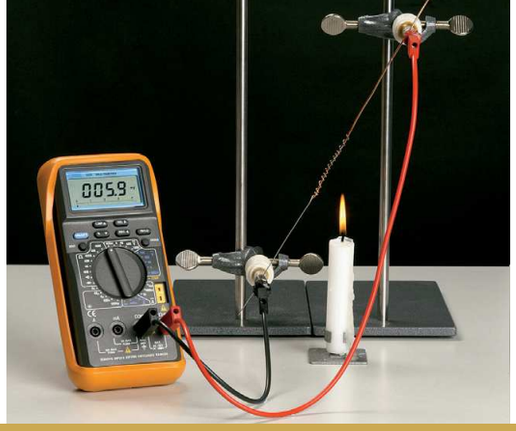
Rakenna Voltan pari asettamalla sinkki- ja kuparilevyt laimeaan suolahappoliuokseen (HCl) tai rikkihappoliuokseen (H_2SO_4). Kytke sinkkilevy volttimittarin miinusnapaan ja kuparilevy plusnapaan. Mittaa sinkki- ja kuparilevyjen välinen jännite. Toista työ käyttäen sitruunaa, kuparinaulaa ja galvanoitua rautanaulaa.

Voltan pari on sähkökemiallinen pari. Jännitteen syntyminen Voltan parissa aiheutuu erilaisista kemiallisista reaktioista, joita levyissä tapahtuu liuoksen vaikuttaessa niihin. Sinkki liukenee suolahappoliuokseen ja luovuttaa siihen positiivisesti varautuneita sinkki-ioneja Zn^{2+}. Sinkkilevystä tulee parin miinusnapa. Kuparilevy luovuttaa elektroneja liuoksen vetyioneille. Kuparilevystä tulee siis parin plusnapa.

Sähköauton latauspaikka Lontoossa.

Sähköpari on tasajännitelähde. Parin lähdejännitteen määräävät parissa tapahtuvat kemialliset reaktiot. Lähdejännite pysyy lähes muuttumattomana niin kauan kuin kemialliset reaktiot tapahtuvat. **Sähköparien yhdistelmää** sanotaan **paristoksi**.

Akku on laite, joka varastoi energiaa kemialliseksi energiaksi. Akku, esimerkiksi matkapuhelimen litiumakku, voidaan ladata tarvittaessa useita kertoja. Kun akkua käytetään, se toimii kuten jännitelähde.



Lämpöparissa kaksi eri metallia on liitetty yhteen. Kuparilanka yhdistetään volttimittarin plusnapaan ja konstantaanilanka miinusnapaan. Jos lankojen liitoskohtaa lämmitetään, niiden vapaiden päiden välille syntyy jännite. Kahden eri metallin välillä on aina tietty jännite, joka riippuu liitoskohdan lämpötilasta.

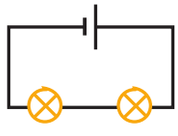
Pohdi ja etsi

1-9. a) Minkälaisia paristoja käytetään kamerassa, laskimessa, herätyskellossa, palohälyttimessä ja erilaisissa kodin sähkölaitteissa?
b) Selvitä elohopeapariston rakenne.
c) Pienoisakut ovat paristojen kokoisia, ja niitä voi ladata. Selvitä nikkelimetallihydridiakun ja litiumakun käyttökohteita.

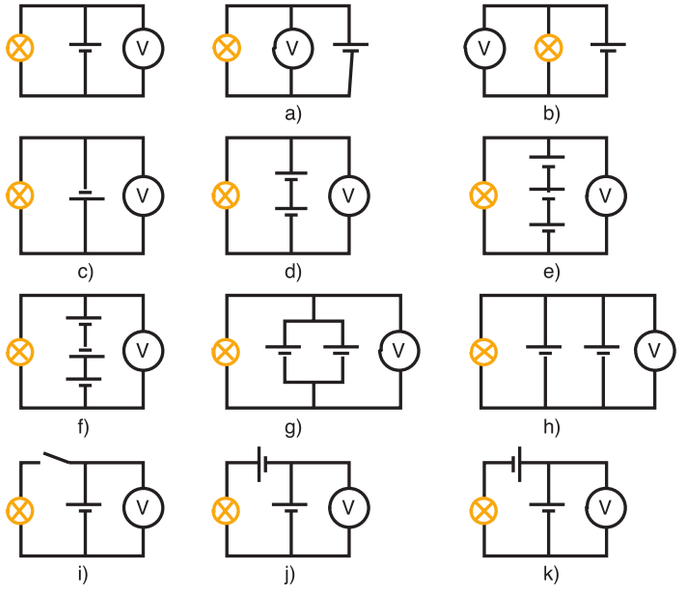
1-10. Ota selvää, millainen käyttöjännite on
a) lasten leluissa
b) kodin sähkölaitteissa
c) katulampuissa.

1-11. Sivun alaosan taulukko on osa metallien sähkökemiallista jännitesarjaa.
a) Mitä taulukosta voi päätellä?
b) Kuinka suuri levyjen välinen jännite on Voltan pari -oppilastyössä?

1-12. Sijoita kuvan kytkentäkaavioon ampeerimittari ja volttimittari, jotta voit mitata piirissä kulkevan sähkövirran sekä toisen lampun napojen välisen jännitteen.



1-13. Oheisessa kytkennässä volttimittarin lukema on 1,5 V. Ilmoita volttimittarin lukemat jokaisessa kytkennässä a–k. Kaikki lamput ja paristot ovat keskenään samanlaisia.



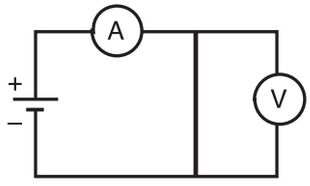
1-14. a) Akusta otetaan 2,0 A sähkövirtaa 16 tunnin ajan. Kuinka paljon akun varaus vähenee?
b) Johtimessa kulkee 2500 C:n varaus 2,5 minuutin aikana. Laske johtimessa kulkevan sähkövirran suuruus. Pohdi, kestääkö tavallisen asunnon sulaketaulun sulake kyseisen virran.
c) Matkapuhelimessa käytettävän akun täysi varaus on 950 mAh. Puhelimen latauslaitteella lataus kestää 55 minuuttia. Kuinka suuri on akun latausvirta?

	Epäjalot metallit						Jalot metallit			
aine	… K	Na	Mg	Al	Zn	Pb	**H**	Cu	Ag	Au …
E/V	−2,9	−2,7	−2,4	−1,7	−0,76	−0,13	**0,00**	+0,34	+0,80	+1,7

1.3 Ohmin laki ja resistanssi

Sivun 16 oppilastyössä havaittiin, että virtapiirin osana oleva lamppu palaa sitä kirkkaammin, mitä suurempi on jännite sen napojen välillä. Tutkitaan sähkövirran riippuvuutta jännitteestä erilaisissa metallijohtimissa.

Ohmin laki



Oppilastyö ▪ Ohmin laki

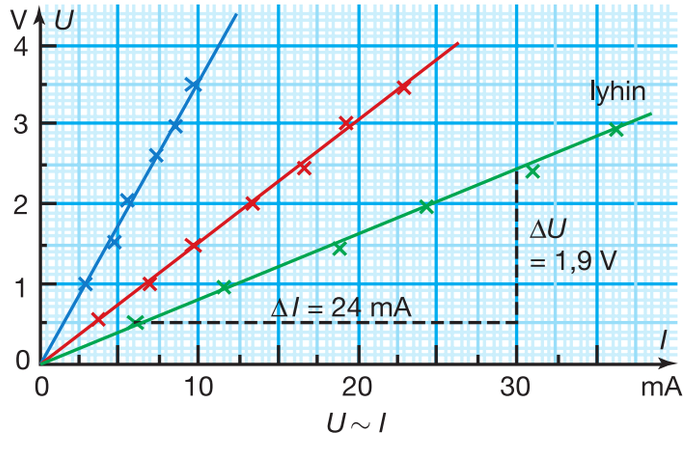
1. Rakenna kuvan mukainen kytkentä. Kiinnitä metallilanka (vastuslanka, esimerkiksi konstantaanilanka) kahden eristetolpan väliin. Kytke langan päät säädettävään jännitelähteeseen. Muuta piirissä kulkevaa sähkövirtaa I säädettävän jännitelähteen avulla ja mittaa langan päiden välinen jännitehäviö U ja sähkövirta I. Käytä pieniä sähkövirtoja, jotta lanka ei lämpene merkittävästi. Kirjoita mittaustulokset taulukkoon ja piirrä kuvaaja (I, U)-koordinaatistoon. Toista koe käyttäen eripituisia tai eri materiaaleista valmistettuja lankoja.

2. Vaihda metallilangan tilalle hehkulamppu ja tee samat mittaukset. Piirrä kuvaaja (I, U)-koordinaatistoon. Vertaa kuvaajaa kohdan 1 kuvaajaan.

Siirretään mittaustulokset (I, U)-koordinaatistoon. Kuhunkin lankaan liittyvät havaintoarvot näyttävät olevan mittaustarkkuuden rajoissa peräkkäin, joten kuvaajat ovat suoria mutta niillä on eri jyrkkyys.

Lyhin johdin

U/V	I/mA
0,5	6,0
1,0	12
1,5	19
2,0	24
2,5	31
3,0	36



Mitä jyrkempi suora on, sitä pienemmän virran tietty jännite aiheuttaa. Jännitehäviö langassa on suoraan verrannollinen siinä kulkevaan sähkövirtaan, eli $U \sim I$.

(I, U)-koordinaatistoon piirretyn suoran fysikaalinen kulmakerroin $\dfrac{\Delta U}{\Delta I}$ on metallilangalle ominainen vakio. Se ilmaisee metallilangan **kyvyn vastustaa sähkövirran kulkua** ja on nimeltään **resistanssi** R.

Ohmin laki
Metallijohtimessa jännitehäviö on vakiolämpötilassa suoraan verrannollinen sähkövirtaan:

$$U = RI,$$

jossa U on johtimessa tapahtuva jännitehäviö, R johtimen resistanssi ja I johtimen läpi kulkeva sähkövirta.

Laki on saanut nimensä saksalaisen fyysikon *Georg Ohmin* (1789–1854) mukaan. Ohmin laki on voimassa metallijohtimissa vain, jos lämpötila pysyy vakiona.

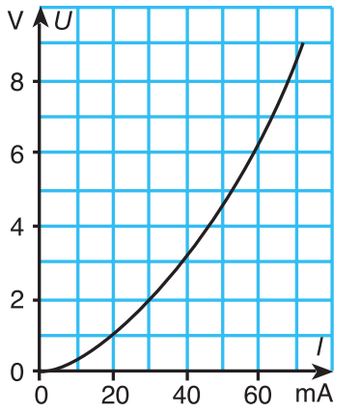
Oppilastyössä käytetyn lyhimmän langan resistanssi on

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{2{,}4\ \text{V} - 0{,}5\ \text{V}}{30\ \text{mA} - 6\ \text{mA}} = \frac{1{,}9\ \text{V}}{24\ \text{mA}} \approx 79\ \Omega.$$

Vastus on sähkövirtaa rajoittava komponentti. Vastuksen resistanssi voidaan määrittää mittaamalla vastuksessa tapahtuva jännitehäviö U ja vastuksen läpi kulkeva sähkövirta I. Resistanssi saadaan yhtälöstä $R = \dfrac{U}{I}$.

Resistanssi
Resistanssi ilmaisee vastuksen, kuten vastuslangan, kyvyn vastustaa sähkövirran kulkua.
Resistanssi R on vastuksessa tapahtuvan jännitehäviön U ja vastuksen läpi kulkevan sähkövirran I suhde: $R = \dfrac{U}{I}$.

Resistanssin yksikkö on $[R] = \dfrac{[U]}{[I]} = \dfrac{1\ \text{V}}{1\ \text{A}} = 1\ \Omega$ (ohmi).



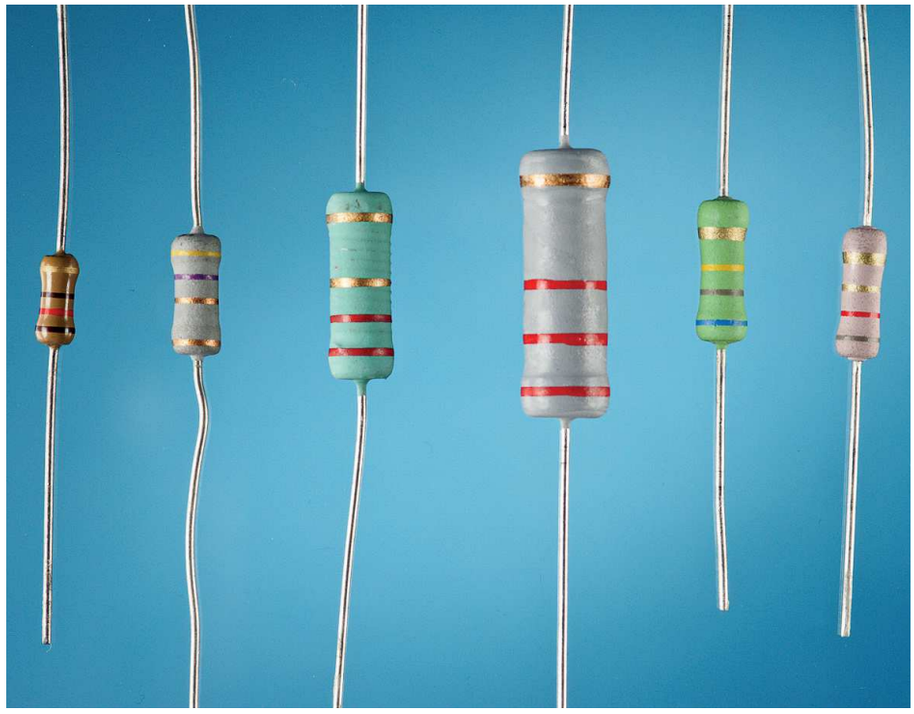
Oppilastyössä tutkitun hehkulampun hehkulangan lämpötila nousee sähkövirran ja jännitteen kasvaessa. Viereisessä piirroksessa on esitetty hehkulangan päiden välinen jännitehäviö sähkövirran funktiona.

Hehkulamppu ei noudata Ohmin lakia. Hehkulangan ja yleensäkin metallijohtimien resistanssi kasvaa lämpötilan noustessa, vaikka johtimeen syntynyt sähkövirta olisi pieni. Tällöin resistanssi voidaan laskea halutulla sähkövirran arvolla yhtälöstä $R = \frac{U}{I}$.

Kun oppilastyön mittauksessa hehkulangan läpi kulki 30 mA:n suuruinen sähkövirta, hehkulangassa tapahtui 2,0 V:n jännitehäviö. Tällöin hehkulangan resistanssi oli

$$R = \frac{U}{I} = \frac{2{,}0\ \text{V}}{30\ \text{mA}} \approx 67\ \Omega.$$

Vastuksen resistanssi voidaan päätellä sen värikoodista. Resistanssi voidaan mitata myös yleismittarilla, joka mittaa vastuksen läpi kulkevan sähkövirran. Mittarissa on paristo, jonka napoihin tutkittava vastus kytketään.



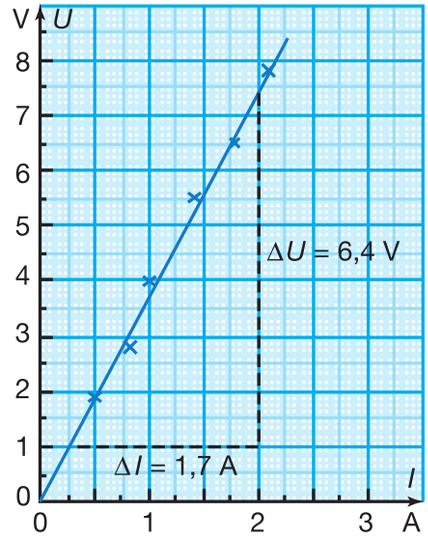
Esimerkki 1

Vastuslangan resistanssin määrittämiseksi mitattiin vastuslangan päiden välinen jännitehäviö ja langan läpi kulkeva sähkövirta. Mittaustulokset taulukoitiin:

I/A	0,50	0,80	1,05	1,45	1,80	2,10
U/V	1,94	2,80	4,00	5,50	6,50	7,76

a) Esitä jännitehäviö graafisesti sähkövirran funktiona.
b) Noudattaako vastuslanka Ohmin lakia?
c) Mikä on vastuslangan resistanssi?

a) Taulukoitujen arvojen avulla saadaan $U = U(I)$ -kuvaaja:



b) Mittaustulokset asettuvat mittaustarkkuuden rajoissa (I, U)-koordinaatistossa samalle suoralle, joten vastuslanka noudattaa Ohmin lakia.

c) Vastuslangan resistanssi saadaan (I, U)-koordinaatistoon piirretyn suoran fysikaalisesta kulmakertoimesta:

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{7{,}4\ \text{V} - 1{,}0\ \text{V}}{2{,}0\ \text{A} - 0{,}3\ \text{A}} = \frac{6{,}4\ \text{V}}{1{,}7\ \text{A}} \approx 3{,}8\ \Omega.$$

Vastuslangan resistanssi on 3,8 Ω.

Ihmiskehon resistanssi sormenpäiden välillä on luokkaa 5 kΩ, kun iho on kuiva. Kun iho on märkä, resistanssi pienenee merkittävästi. Mittaa oma resistanssisi.

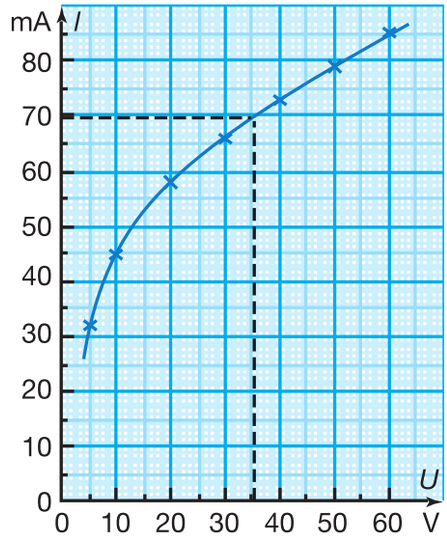
Esimerkki 2

Laboratoriossa mitattiin volframilankaisen hehkulampun läpi kulkevaa virtaa jännitteen funktiona, jolloin saatiin alla olevat tulokset:

U/V	5	10	20	30	40	50	60
I/mA	32	45	58	66	73	79	85

a) Piirrä hehkulampun $I = I(U)$ -kuvaaja.
b) Kuinka suuri on lampun resistanssi, kun lampun jännite on 35 V?
c) Millä tavoin resistanssi riippuu lampun läpi kulkevasta virrasta? Miksi resistanssi ei pysy vakiona? [S2000, 1]

a) Piirretään sähkövirta jännitteen funktiona eli $I = I(U)$ -kuvaaja.



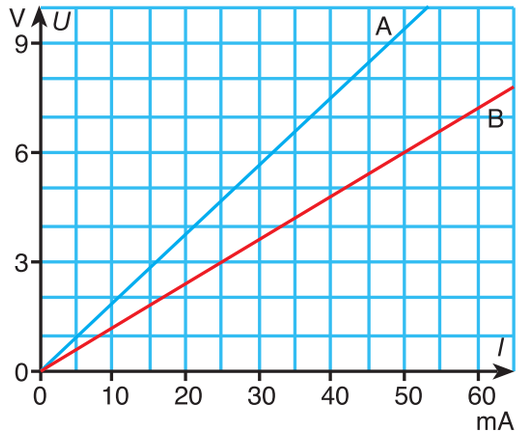
b) Kuvaajasta nähdään, että jännitteen ollessa 35 V sähkövirta on noin 70 mA.

Hehkulampun resistanssi on $R = \frac{U}{I} = \frac{35\ \text{V}}{0{,}070\ \text{A}} \approx 500\ \Omega$.

c) Sähkövirran kasvaessa lampun hehkulangan lämpötila nousee, jolloin langan resistanssi kasvaa. Siksi sähkövirran kasvu hidastuu, vaikka jännite kasvaa.

Tehtäviä

1-15. Kuvaaja esittää kahdessa vastuslangassa tapahtuvaa jännitehäviötä sähkövirran funktiona.



a) Kuinka suuri on vastuslankojen A ja B jännitehäviö, kun niiden läpi kulkeva sähkövirta on 25 mA?
b) Kuinka suuri sähkövirta vastuslangoissa A ja B kulkee, kun niissä tapahtuva jännitehäviö on 6,0 V?
c) Määritä vastuslankojen resistanssit.

1-16. Oppilastyössä tutkittiin vastuslangan jännitehäviötä sähkövirran funktiona. Mittaustulokset taulukoitiin:

U/V	0	0,35	0,45	0,59	0,81	1,42	3,99
I/mA	0	16,9	20,7	26,8	38,6	67,6	183

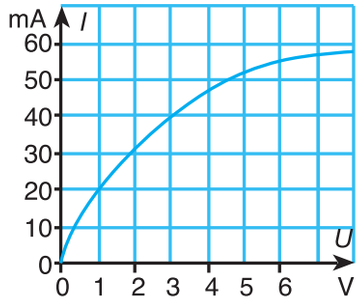
Esitä mittaustulokset (I, U)-koordinaatistossa ja määritä vastuslangan resistanssi.

1-17. Säätövastuksen kanssa sarjaan kytketty polttimo yhdistettiin kuuden voltin akkupariston napoihin. Kun sopivia mittareita käyttäen tutkittiin polttimon jännitehäviötä sähkövirran funktiona, saatiin oheisen taulukon mukaiset tulokset:

I/A	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50
U/V	0,10	0,20	0,31	0,43	0,60	0,77	1,06	1,49	2,04	2,65

a) Piirrä kytkentäkaavio.
b) Piirrä $U = U(I)$ -kuvaaja.
c) Noudattaako polttimon hehkulanka Ohmin lakia? Perustele saamasi tulos. [S2003, 7]

1-18. Kuvaaja esittää erään komponentin sähkövirtaa jännitehäviön funktiona.



a) Noudattaako komponentti Ohmin lakia?
b) Kuinka suuri on komponentin jännitehäviö, kun komponentin läpi kulkeva sähkövirta on 50 mA?
c) Laske komponentin resistanssi, kun siinä tapahtuva jännitehäviö on 3,0 V.

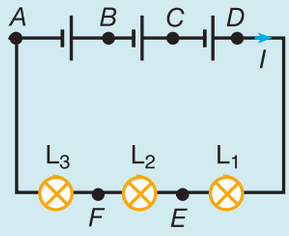
1-19. Vastuksen läpi kulkee 1,08 A:n sähkövirta, kun sen päiden välinen jännite on 7,35 V.
a) Kuinka suuri on sähkövirta, kun jännite on 15,0 V? Johdin ei juuri lämpene.
b) Kuinka suuri jännitteen on oltava, jotta sähkövirta olisi 0,200 A?

1-20. Rakennustyömaalle vedettiin sähkökaapeli. Kun kaapelin toinen pää oli +226 V:n potentiaalissa, kaapelin toisessa päässä oli potentiaali +208 V.
a) Kuinka suuri oli jännitehäviö kaapelissa?
b) Mikä oli kaapelin resistanssi, kun kaapelissa kulki 6,0 A:n virta?

Potentiaali ja jännitehäviö

Oppilastyö ▪ Piirin potentiaali

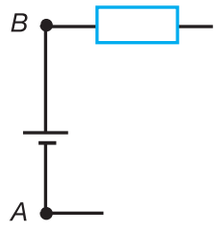
Tee kuvan kytkentä. Käytä 1,5 V:n paristoja ja samanlaisia lamppuja. Mittaa volttimittarilla pariston negatiivisen navan A ja pisteiden B, C, D, E ja F väliset jännitteet.



Oppilastyössä sähkövirta pysyy mittauksen aikana vakiona ja siten myös lamppujen vastuslankojen lämpötila pysyy muuttumattomana. Työssä havaitaan mm. jännitteet $U_{BA} = 1{,}5$ V, $U_{CA} = 3{,}0$ V ja $U_{DA} = 4{,}5$ V, eli kun kuljetaan virran suunnassa kohdasta A kohtaan D, jännite kasvaa. Mittausten mukaan jännite $U_{EA} \approx 3{,}1$ V ja jännite $U_{FA} \approx 1{,}5$ V.

Piirin **potentiaali** V ilmaisee virtapiirin pisteiden jännitteet sovittuun nollapotentiaaliin nähden. Potentiaalitarkasteluissa jokin virtapiirin pisteen potentiaali **sovitaan nollaksi** eli **piste maadoitetaan**. Tämän pisteen potentiaali on $V = 0$ V. Muiden pisteiden potentiaalia verrataan tähän pisteeseen. Jos maadoitusta ei tehdä, potentiaalikäyrä on samanmuotoinen mutta siinä ei voida ilmoittaa todellisia potentiaalilukemia vaan ainoastaan potentiaalieroja.

Virtapiirin minkä tahansa pisteen potentiaali voidaan mitata volttimittarilla, kun mittarin miinusnapa kytketään maadoituskohtaan ja plusnapa tutkittavaan pisteeseen. Jos virtapiirin kaksi eri pistettä maadoitetaan, näiden pisteiden välillä ei ole jännitettä. Jos näiden pisteiden väliin on kytketty esimerkiksi hehkulamppu, sen läpi ei kulje sähkövirtaa ja lamppu ei valaise. Kahden pisteen välinen **jännite** ilmaistaan pisteiden **potentiaalien avulla**.



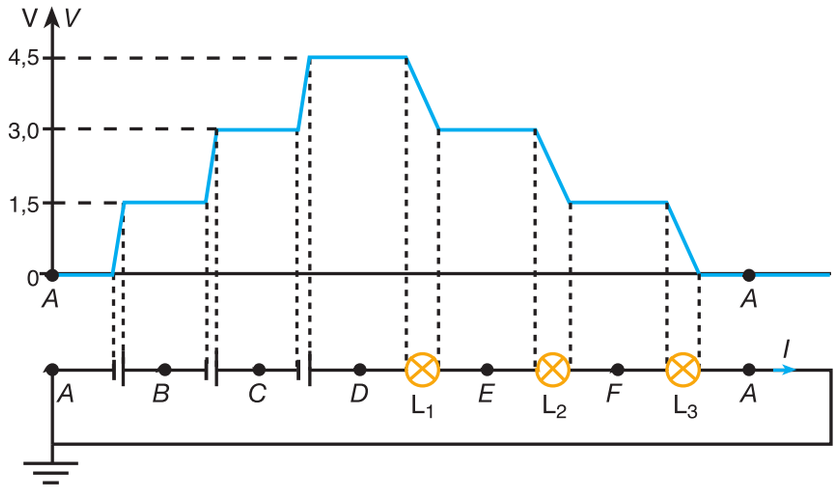
Pisteiden B ja A välinen jännite on $U_{BA} = V_B - V_A$.

Potentiaali ja jännite
Virtapiirissä pisteiden B ja A välinen jännite U_{BA} on näiden pisteiden potentiaalien erotus eli potentiaaliero:

$$U_{BA} = V_B - V_A.$$

Virtapiirin potentiaalia kuvataan **potentiaalikäyrällä**. Potentiaalikäyrä esittää piirin potentiaalia paikan funktiona. Sähkövirran suunta valitaan usein paikka-akselin positiiviseksi suunnaksi.

Piirretään mittausten perusteella oppilastyön virtapiirin potentiaali paikan suhteen. Maadoitetaan virtapiirin piste A eli $V_A = 0$ V. Kierretään virtapiiri sähkövirran suunnassa eli kuvassa myötäpäivään lähtien pisteestä A.



Potentiaali muuttuu virtapiirissä jännitelähteiden ja komponenttien kohdalla: kun kuljetaan sähkövirran suunnassa, potentiaali kasvaa paristoissa ja alenee lampuissa. Myös johtimissa tapahtuu pientä potentiaalin alenemista, mutta sitä ei oteta piirroksissa huomioon. Koska virtapiiriä kierrettäessä palataan takaisin kohtaan A, potentiaalien muutosten summa suljetulla kierroksella on nolla. Tämä on Kirchhoffin 2. laki.

Kirchhoffin 2. laki
Suljetussa virtapiirissä potentiaalimuutosten summa on nolla eli $\sum \Delta V = 0$.

Koska oppilastyön paristojen napajännitteiden summa on 4,5 V, myös lampuissa tapahtuvien jännitehäviöiden summan on oltava 4,5 V. Virtapiirissä potentiaalimuutosten summa on Kirchhoffin 2. lain mukaan

$$\sum \Delta V = 1{,}5\ \text{V} + 1{,}5\ \text{V} + 1{,}5\ \text{V} - 1{,}5\ \text{V} - 1{,}5\ \text{V} - 1{,}5\ \text{V} = 0\ \text{V}.$$

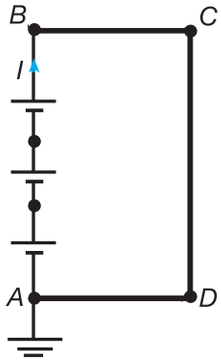
Oppilastyön virtapiirissä esimerkiksi pisteen C potentiaali V_C on pienempi kuin pisteen D potentiaali V_D ja pisteen F potentiaali V_F on pienempi kuin pisteen E potentiaali V_E. Piirin potentiaalin kuvaajasta voidaan laskea eri pisteiden välinen jännite. Esimerkiksi pisteiden B ja A välinen jännite on kyseisten pisteiden potentiaalien ero eli

$$U_{BA} = V_B - V_A = 1{,}5\ \text{V} - 0{,}0\ \text{V} = 1{,}5\ \text{V}.$$

Vastaavasti pisteiden E ja D välinen jännite on

$$U_{ED} = V_E - V_D = 3{,}0\ \text{V} - 4{,}5\ \text{V} = -1{,}5\ \text{V}.$$

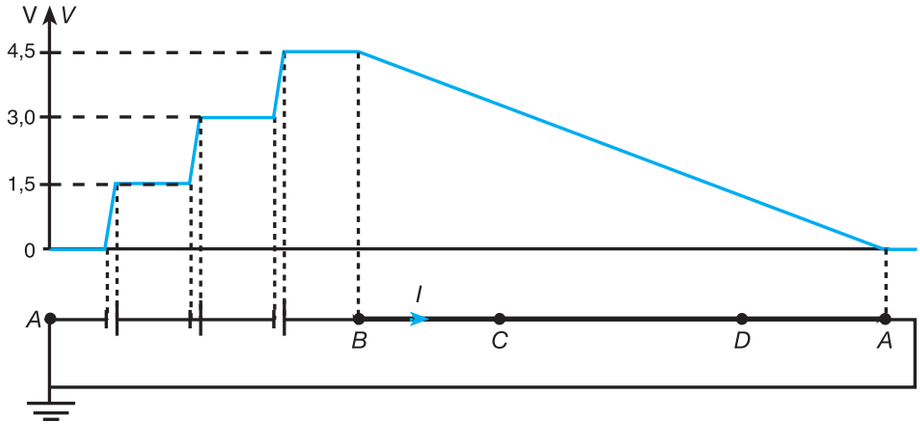
Esimerkki 3



Kuvan kytkennässä jokaisen pariston jännite on 1,5 V. Välillä *BCDA* on homogeeninen vastuslanka, ja piste *A* on maadoitettu. Piirrä virtapiirin potentiaalikäyrä.

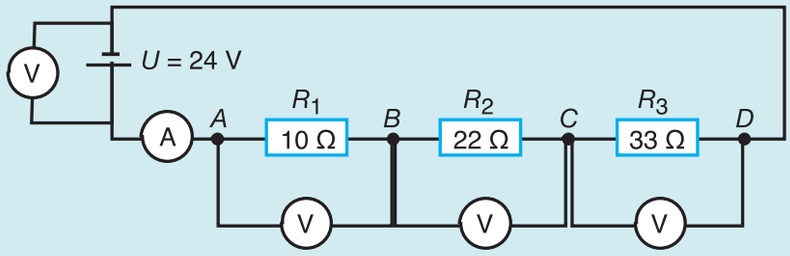
Pisteessä A potentiaali $V_A = 0$ V, koska piste A on maadoitettu. Kun tarkastellaan virtapiirin potentiaalia sähkövirran suunnassa, potentiaali kasvaa paristoissa ja alenee vastuslangassa.

Kirchhoffin 2. lain mukaan potentiaalimuutosten summa on suljetussa virtapiirissä nolla. Koska paristojen napajännitteiden summa on 4,5 V, myös vastuslangassa tapahtuvan jännitehäviön on oltava 4,5 V: $\sum \Delta V = 1{,}5\ \text{V} + 1{,}5\ \text{V} + 1{,}5\ \text{V} - 4{,}5\ \text{V} = 0\ \text{V}$. Piirin potentiaali paikan suhteen on kuvan mukainen.



Oppilastyö ▪ Jännitehäviö virtapiirissä

Tee kuvan mukainen kytkentä. Mittaa volttimittarilla jännitelähteen jännite ja kussakin vastuksessa tapahtuva jännitehäviö. Laske jännitehäviöt yhteen ja vertaa summaa jännitelähteen napajännitteeseen. Lue ampeerimittarin lukema. Laske kussakin vastuksessa tapahtuva jännitehäviö sähkövirran arvoa käyttäen. Vertaa tuloksia mittaamalla saatuihin jännitehäviöiden arvoihin.



Hehkulampussa jännitehäviö aiheutuu energian muuntumisesta toiseen muotoon. Lampun (johtimen tai vastuksen) päiden välinen jännitehäviö voidaan laskea yhtälöstä $U = RI$, jossa R on resistanssi ja I sähkövirta.

Oppilastyössä käytettiin kolmea vastusta, joiden resistanssit olivat 10 Ω, 22 Ω ja 33 Ω. Jännitelähteen jännite oli mittausten mukaan 24 V. Vastuksissa mitatut jännitehäviöt olivat

$$U_{AB} = 3{,}67\ \text{V},\ U_{BC} = 7{,}99\ \text{V ja } U_{CD} = 12{,}04\ \text{V}.$$

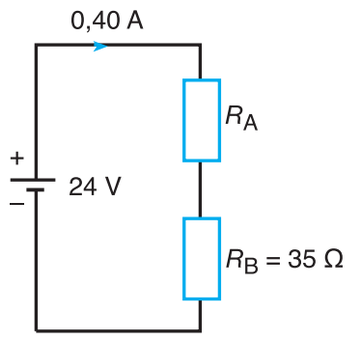
Vastusten jännitehäviöiden summaksi tulee mittaustarkkuuden rajoissa 24 V. Se on yhtä suuri kuin jännitelähteen napajännite.

Oppilastyön kytkennässä ampeerimittari näytti arvoa 0,376 A. Vastuksissa tapahtuneet jännitehäviöt olivat seuraavat:

$$U_{AB} = R_1 I = 10\ \Omega \cdot 0{,}376\ \text{A} = 3{,}76\ \text{V}$$
$$U_{BC} = R_2 I = 22\ \Omega \cdot 0{,}376\ \text{A} = 8{,}272\ \text{V}$$
$$U_{CD} = R_3 I = 33\ \Omega \cdot 0{,}376\ \text{A} = 12{,}408\ \text{V}.$$

Laskemalla saadut tulokset vastaavat oppilastyössä kokeellisesti mittaamalla saatuja arvoja.

Esimerkki 4



Laske kuvan kytkennässä
a) vastuksessa R_B tapahtuva jännitehäviö
b) vastuksen R_A resistanssi.

$U = 24\ \text{V}, \quad I = 0{,}40\ \text{A}, \quad R_B = 35\ \Omega$

a) Koska virtapiirissä on vain yksi silmukka, kaikkialla piirissä kulkeva sähkövirta on 0,40 A. Vastuksessa R_B tapahtuva jännitehäviö on

$$U = R_B I = 35\ \Omega \cdot 0{,}40\ \text{A} = 14\ \text{V}.$$

Jännitehäviö on 14 V.

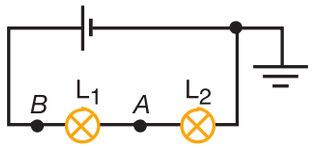
b) Koska jännitelähteen jännite on 24 V ja vastuksessa B tapahtuva jännitehäviö on 14 V, vastuksessa R_A tapahtuva jännitehäviö on $U_A = 24\ \text{V} - 14\ \text{V} = 10\ \text{V}$. Vastuksen R_A resistanssi on

$$R_A = \frac{U_A}{I} = \frac{10\ \text{V}}{0{,}40\ \text{A}} = 25\ \Omega.$$

Resistanssi on 25 Ω.

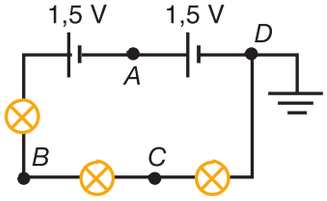
Tehtäviä

1-21. Vastaa perustellen.



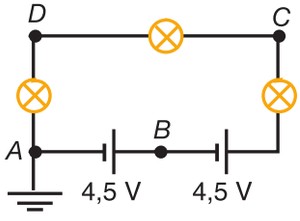
Valaiseeko lamppu
a) L_1, jos piste A maadoitetaan
b) L_2, jos piste A maadoitetaan
c) L_1, jos piste B maadoitetaan?

1-22. Kuvan kytkennässä on vain yhdenlaisia lamppuja ja paristoja.



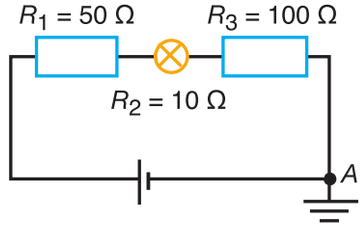
a) Määritä pisteiden A, B ja C potentiaalit.
b) Mitä tapahtuu, kun myös piste B maadoitetaan?

1-23. Kuvan kytkennässä on vain yhdenlaisia lamppuja ja paristoja.

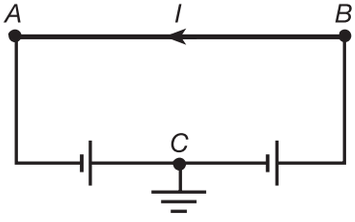


Laske pisteiden
a) B ja A b) A ja B c) D ja A
välinen jännite.

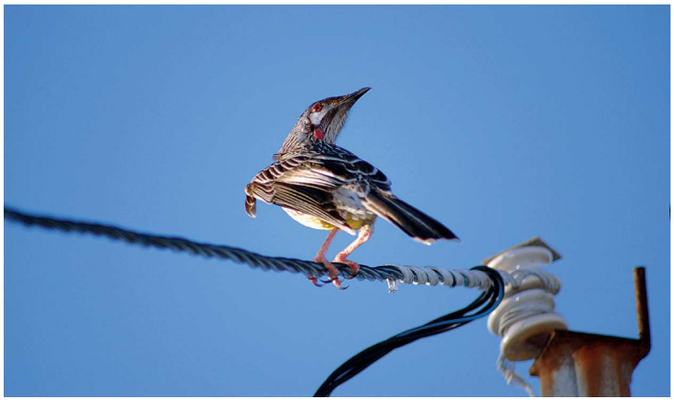
1-24. Kuvan mukaisessa virtapiirissä mitattiin 0,20 A:n sähkövirta.
a) Laske kussakin vastuksessa tapahtuva jännitehäviö.
b) Mikä on jännitelähteen napajännite?
c) Piirrä piirin potentiaalikäyrä lähtien pisteestä A myötäpäivään.



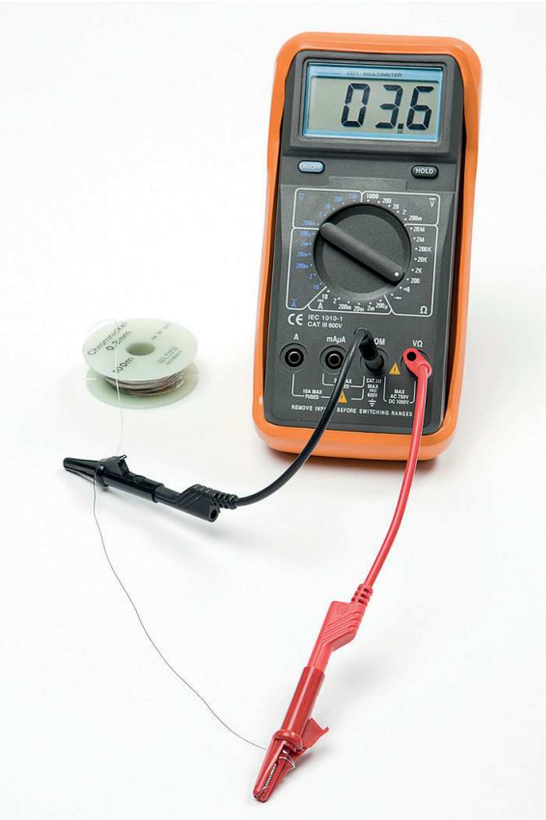
1-25. Kuvan virtapiirissä jännitelähteiden napajännitteet ovat 3,0 V ja välillä AB on tasapaksu metallilanka.
a) Kuinka suuri jännitehäviö langassa tapahtuu?
b) Piirrä virtapiirin potentiaalikäyrä lähtien pisteestä C vastapäivään.
Jännitelähteiden sisäiset resistanssit ovat pieniä.



Linnun molemmat jalat ovat sähkölinjalla samassa potentiaalissa, ja linnun läpi ei kulje sähkövirtaa. Jos ihminen kurkottelee sähkölinjan lähelle, potentiaaliero linjan ja maan välillä voi olla tuhansia voltteja. Tällainen tilanne on hengenvaarallinen. Selvitä, kuinka suuria jännitteitä on sähköjohdoissa.



Resistiivisyys



Oppilastyö ▪ Resistanssin riippuvuus metallilangan materiaalista, pituudesta ja poikkipinta-alasta

1. Mittaa yleismittarilla vähintään kahden eri metallista valmistetun, samanpituisen ja -paksuisen metallilangan resistanssi. Vertaa resistansseja toisiinsa.

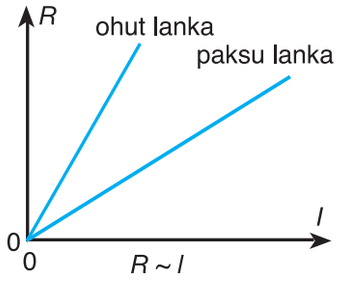
2. Mittaa yleismittarilla metallilangan resistanssi. Toista mittaus useasti käyttäen samaa lankaa mutta aina eripituisena. Tee vastaavat mittaukset käyttäen paksumpaa lankaa tai vaihtoehtoisesti ohutta lankaa kierrettynä moninkertaisena päällekkäin. Taulukoi mittaustulokset ja esitä ne (l, R)-koordinaatistossa. Miten langan resistanssi riippuu langan pituudesta l?

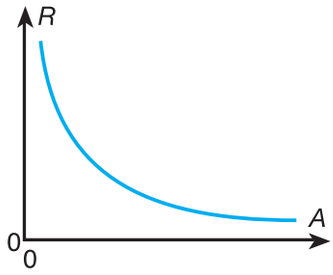
3. Tutki, miten samanpituisten ja samaa ainetta olevien metallilankojen resistanssi riippuu langan paksuudesta (poikkipinta-alasta A). Taulukoi mittaustulokset ja esitä ne (A, R)- ja $\left(\frac{1}{A}, R\right)$-koordinaatistoissa. Jos käytettävissä on vain yhtä lankaa, voit käyttää sitä kaksin- tai kolminkertaisena.

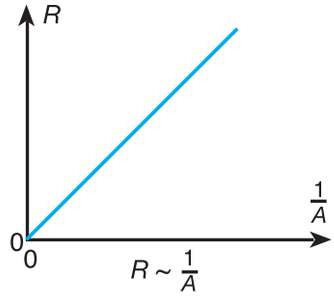
Oppilastyön ensimmäisessä kohdassa todettiin, että resistanssi riippuu langan materiaalista. Samanpituisista ja -paksuisista langoista esimerkiksi konstantaanilangan resistanssi oli moninkertainen rautalangan resistanssiin verrattuna.

Kun oppilastyössä tutkittiin metallilangan pituuden vaikutusta resistanssiin, mittaustulokset asettuivat (l, R)-koordinaatistossa mittaustarkkuuden rajoissa samalle origon kautta kulkevalle suoralle. Ohueen lankaan liittyvä suora on jyrkempi kuin paksumpaan liittyvä suora. Molemmissa tapauksissa langan resistanssi on verrannollinen johtimen pituuteen eli $R \sim l$.

Metallilangan lämpeneminen riippuu mm. sen materiaalista.







Oppilastyön perusteella samanpituisten metallilankojen resistanssi on sitä pienempi, mitä paksumpi lanka on. Havainnosta voi päätellä, että langan resistanssi on kääntäen verrannollinen langan paksuuteen. Kun samanpituisten lankojen resistanssin riippuvuus langan poikkipinta-alasta esitetään $\left(\frac{1}{A}, R\right)$-koordinaatistossa, mittauspisteet asettuvat mittaustarkkuuden rajoissa samalle suoralle. Langan resistanssi on siis kääntäen verrannollinen langan poikkipinta-alaan eli $R \sim \frac{1}{A}$.

Resistanssi

Metallilangan resistanssi riippuu langan materiaalista ja on suoraan verrannollinen langan pituuteen ja kääntäen verrannollinen langan poikkipinta-alaan.

Metallilangan resistanssi saadaan yhtälöstä

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

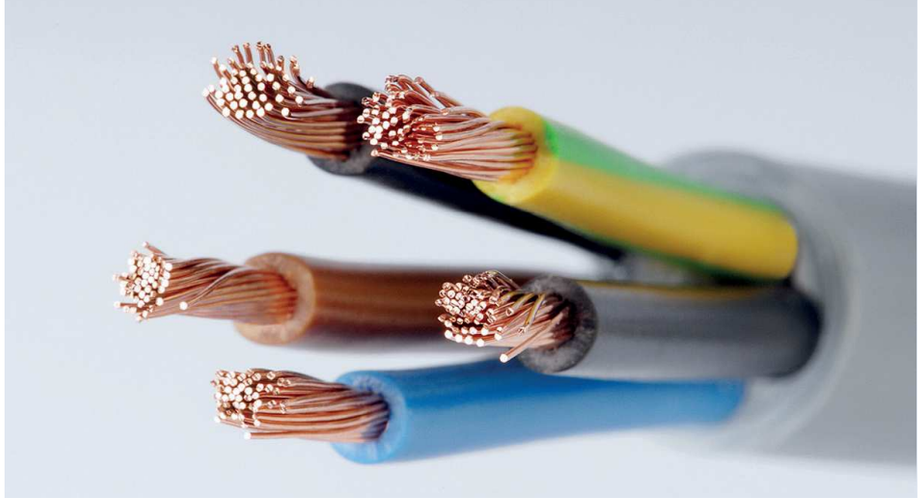
jossa ρ on aineen resistiivisyys, l langan pituus ja A langan poikkipinta-ala. Yhtälö on voimassa kaikille metallijohtimille.

Resistiivisyyksiä

Johteita	$\rho/10^{-8}$ Ωm (20 °C)
grafiitti	1375,0
rauta	9,71
kupari	1,678
volframi	5,65
alumiini	2,655
kulta	2,35
Eristeitä	$\rho/10^{12}$ Ωm
akryyli	1000
posliini	3

Resistiivisyys ρ kuvaa aineen kykyä vastustaa sähkövirran kulkua. Kullakin aineella (materiaalilla) on sille ominainen resistiivisyys. Hyvän sähköjohteen resistiivisyys on pieni. Kun sähköjohdin tai laite pitää eristää hyvin, tarvitaan eristeitä, joiden resistiivisyys on hyvin suuri. Huomaa, että resistanssi R on laitteen tai johtimen ominaisuus, kun taas resistiivisyys on tietyn materiaalin ominaisuus.

Resistiivisyyden yksikkö on $[\rho] = \frac{[R][A]}{[l]} = \frac{1\ \Omega \cdot 1\ \text{m}^2}{1\ \text{m}} = 1\ \Omega\text{m}.$



Sähköjohtimet valmistetaan metalleista, koska ne ovat hyviä johteita. Metalliydin suojataan eristekerroksella (muovilla).

Esimerkki 5

Oppilastyössä pyrittiin selvittämään pinnaltaan hieman tummuneen metallilangan valmistusmateriaali. Langan pituudeksi mitattiin 1,1 m ja poikkipinta-alaksi 3,5 mm^2. Langan resistanssiksi mitattiin yleismittarilla 8,5 mΩ. Mitä materiaalia metallilanka oli?

$l = 1{,}1\ \text{m}, \quad A = 3{,}5\ \text{mm}^2 = 3{,}5 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2, \quad R = 8{,}5\ \text{m}\Omega$

Lasketaan mitattujen tietojen perusteella metallilangan resistiivisyys. Yhtälöstä $R = \rho\dfrac{l}{A}$ resistiivisyydeksi saadaan

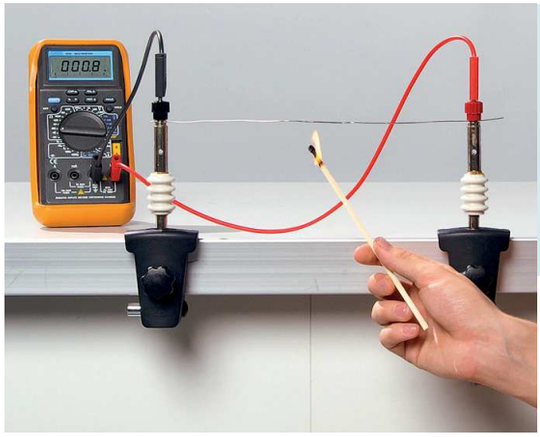
$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{0{,}0085\ \Omega \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2}{1{,}1\ \text{m}} \approx 2{,}7 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}.$$

Taulukkokirjan mukaan lanka on todennäköisesti alumiinia.

Sähkönsiirtolinjoissa käytettävien sähköjohtimien tulee olla hyvin sähköä johtavaa metallia ja mielellään paksuja.

Lämpötilan vaikutus resistanssiin

Edellä todettiin, että metallijohtimen resistanssi riippuu käytettävän langan pituudesta ja poikkipinta-alasta sekä aineen resistiivisyydestä. On mahdollista valmistaa vastuksia, joiden resistanssi riippuu lämpötilasta, valon määrästä tai esimerkiksi jonkin voiman aiheuttamasta jännityksestä. Resistanssin muutos voikin olla lämpömittarin tai valaistus- ja voimamittarin toiminnan fysikaalinen perusta.



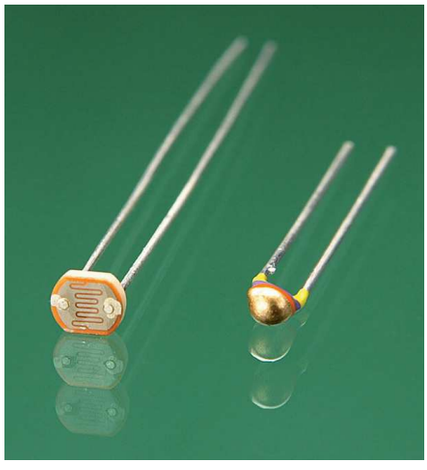
Oppilastyö ▪ Metallilangan resistanssin riippuvuus lämpötilasta

Mittaa yleismittarilla rautalangan resistanssi. Lämmitä rautalankaa varovasti liekillä. Tarkkaile yleismittarin lukemaa, kun lanka lämpenee. Tarkkaile mittaria myös langan jäähtyessä.

Oppilastyössä havaitaan, että rautalangan resistanssi kasvaa lämpötilan noustessa. Resistanssin kasvu johtuu siitä, että lämpötilan noustessa rakennehiukkasten satunnainen lämpöliike johtimessa kasvaa ja sähkövirran kulku vaikeutuu. Langan jäähtyessä resistanssi pienenee.

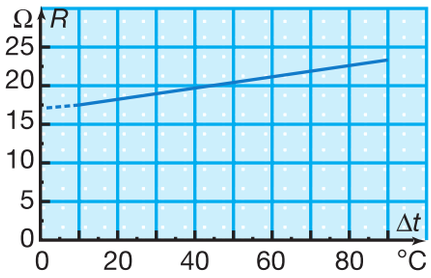
Edellä todettiin, että resistiivisyys ρ kuvaa aineen kykyä vastustaa sähkövirran kulkua. Resistiivisyyden lämpötilariippuvuutta kuvaa yhtälö $\rho = \rho_{20}(1 + \alpha\Delta T)$, jossa ρ on metallilangan resistiivisyys lämpötilassa T, ρ_{20} saman langan resistanssi lämpötilassa 20 °C = 293 K ja $\Delta T = T - 293$ K. Kerroin α on nimeltään **resistiivisyyden lämpötilakerroin**. Resistiivisyyden lämpötilakertoimen yksikkö on $[\alpha] = \frac{1}{\text{K}}$. Metallilangan lämpölaajeneminen on yleensä niin vähäistä, että langan pituus ja poikkipinta-ala pysyvät lähes muuttumattomina.

Valolle ja lämmölle herkkiä vastuksia.



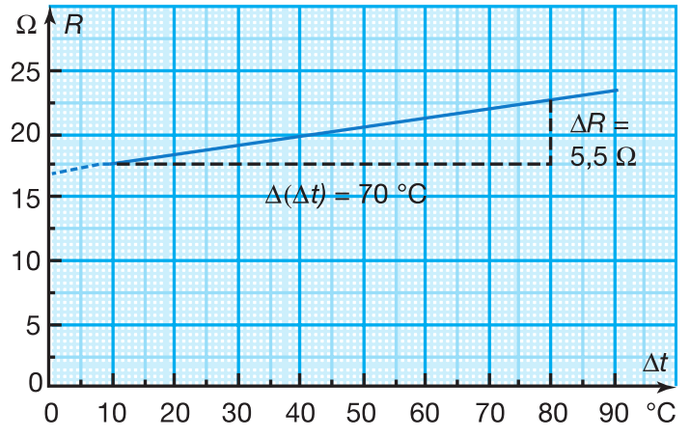
Aineita, joiden resistiivisyyden lämpötilakertoimet ovat suuret, voidaan käyttää lämpötilan mittaukseen. Lämpötilan muuttuessa virtapiirin resistanssi muuttuu, mikä muuttaa piirissä kulkevaa sähkövirtaa. Ampeerimittarin asteikko kalibroidaan näyttämään lämpötilaa.

Esimerkki 6



Metallilangan resistanssin riippuvuus lämpötilasta voidaan laskea yhtälöstä $R = R_{20}(1 + \alpha\Delta t)$, jossa R on langan resistanssi lämpötilassa t, R_{20} saman langan resistanssi lämpötilassa 20 °C ja $\Delta t = t - 20$ °C. Kerroin α on resistiivisyyden lämpötilakerroin. Kirkkaan metallilangan resistanssin lämpötilariippuvuutta tutkittiin tietokonepohjaisen mittausjärjestelmän avulla. Aluksi metallilanka oli huoneen lämpötilassa (+20 °C). Lankaa lämmitettiin. Mittaus käynnistettiin, kun langan lämpötila oli kohonnut 10 °C, ja lopetettiin, kun lämpötila oli kohonnut 85 °C. Määritä kuvaajan avulla
a) metallilangan resistanssi 20 °C:n lämpötilassa
b) metallilankamateriaalin resistiivisyyden lämpötilakerroin.

a) Kuvaajan suoran yhtälö on muotoa
$R = R_{20}(1 + \alpha\Delta t) = R_{20} + R_{20}\alpha\Delta t.$
Näin ollen metallilangan resistanssi 20 °C:n lämpötilassa saadaan ekstrapoloimalla suoraa R-akselille: $R_{20} \approx 17\ \Omega$.



b) Suoran fysikaalinen kulmakerroin (Δt, R)-koordinaatistossa on

$$\frac{\Delta R}{\Delta(\Delta t)} = \frac{5{,}5\ \Omega}{70\ ^\circ\text{C}} \approx 0{,}078571\ \Omega/^\circ\text{C}.$$

Koska suoran $R = R_{20} + R_{20}\alpha\Delta t$ kulmakerroin on $R_{20}\alpha$, saadaan yhtälö $R_{20}\alpha = 0{,}078571\ \Omega/^\circ\text{C}$.

Resistiivisyyden lämpötilakerroin on

$$\alpha = \frac{0{,}078571\ \Omega/^\circ\text{C}}{R_{20}} = \frac{0{,}078571\ \Omega/^\circ\text{C}}{17\ \Omega} \approx 4{,}6 \cdot 10^{-3}\ 1/^\circ\text{C}.$$

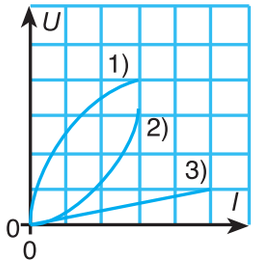
Tutkittavan metallilangan resistiivisyyden lämpötilakerroin on $4{,}6 \cdot 10^{-3}\ 1/^\circ\text{C} = 4{,}6 \cdot 10^{-3}\ 1/\text{K}$.

Pohdi ja etsi

1-26. a) Milloin voit määrittää johtimen resistanssin yhtälöstä $R = \frac{\Delta U}{\Delta I}$?

b) Miksi resistanssin laskemiseen on joskus käytettävä yhtälöä $R = \frac{U}{I}$?

c) Kuvaajat on saatu tutkittaessa aineiden sähköisiä ominaisuuksia vakiolämpötilassa. Mikä kuvaaja edustaa metallijohdinta?

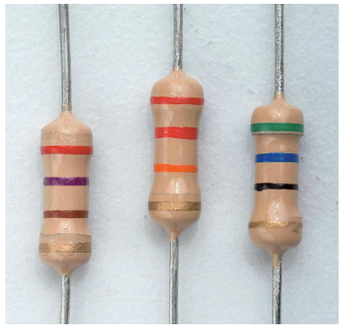


d) Mitä tarkoittaa se, että resistanssi on kappaleen ominaisuus ja resistiivisyys on aineen ominaisuus?

e) Mistä tekijöistä metallijohtimen resistanssi riippuu?

1-27. Selvitä, mitä tarkoittavat LDR-, PTC-, NTC- ja VDR-vastukset ja mihin niitä käytetään.

1-28. Selvitä kuvassa näkyvän vastuksen resistanssi siihen merkittyjen värikoodien avulla.



1-29. a) Miksi sähkön avulla siirrettävän energian siirtomatkan tulisi olla lyhyt?

b) Miksi tietokoneiden mikropiirien jalkoihin tulevat langat päällystetään usein kullalla?

1-30. Selvitä, miten suprajohteet liittyvät resistiivisyyteen.

Tehtäviä

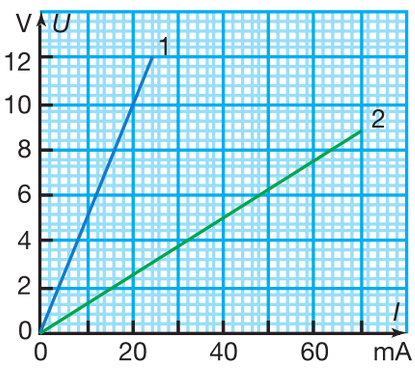
1-31. Oppilaat määrittivät kokeellisesti kahden vastuslangan resistanssin. Käytössä oli 12,0 V:n akku, säätövastus, ampeeri- ja volttimittari, johtimia ja kaksi vastuslankaa, jotka olivat samaa materiaalia ja yhtä pitkiä mutta eripaksuisia. Vastuslangan resistanssin määrittämiseksi mitattiin langan läpi kulkenut virta ja langan päiden välinen jännitehäviö. Mittaustulokset ovat oheisessa kuvassa.

a) Piirrä mittauksen kytkentäkaavio.

b) Määritä kummankin langan resistanssi.

c) Kumpi langoista oli paksumpi?

d) Määritä lankojen paksuuksien (poikkipinta-alan halkaisijoiden) suhde.



1-32. a) Alumiinilangan poikkipinta-ala on 0,25 cm^2 ja pituus 12 km. Kuinka suuri on alumiinilangan resistanssi?
b) Kuinka suuri tulisi alumiinilangan poikkipinta-alan olla, jotta langan resistanssi pienenisi puoleen?
c) Kuinka suuri jännitehäviö syntyy 1,00 km:n pituisessa alumiinikaapelissa, jonka halkaisija on 4,4 mm, kun kaapelissa kulkee 12 A:n virta?

1-33. Metallilangan resistanssi on R. Lanka venytetään pituudeltaan kolminkertaiseksi. Oletetaan, että langan tiheys ja resistiivisyys eivät muutu venytyksessä. Miten langan resistanssi muuttuu?

1-34. Fysiikan työkurssilla tutkittiin metallilankaa, jonka pituus oli 2,4 m ja halkaisija 0,82 mm. Työssä mitattiin langan päiden välinen jännitehäviö ja langassa kulkeva sähkövirta. Tulokset taulukoitiin. Esitä mittaustulokset sopivassa koordinaatistossa ja määritä kuvaajan avulla, mitä metallia kyseinen lanka oli.

U/mV	I/mA
3,9	49
9,8	122
29,7	371
38,5	480
53,8	672
68,3	853

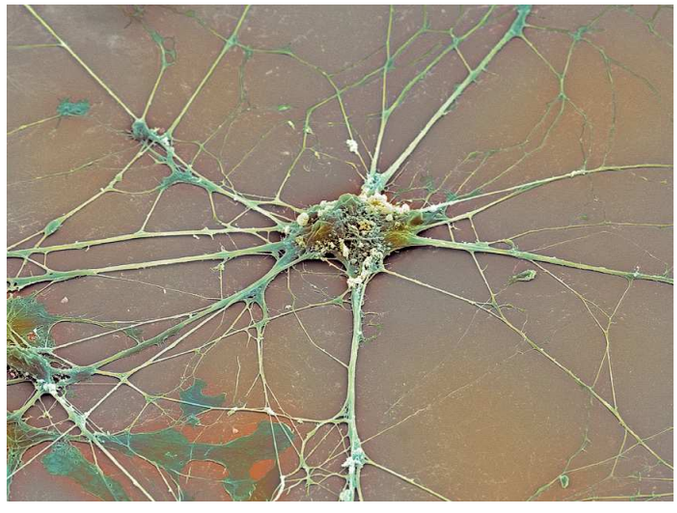
1-35. Metallilangan resistanssin riippuvuus lämpötilasta voidaan laskea yhtälöstä $R = R_{20}(1 + \alpha\Delta t)$, jossa R on langan resistanssi lämpötilassa t, R_{20} saman langan resistanssi lämpötilassa 20 °C ja $\Delta t = t - 20\ °C$. Kerroin α on resistiivisyyden lämpötilakerroin. Hehkulampun volframilangan resistanssi huoneen lämpötilassa (20 °C) on 6,0 Ω. Mikä on langan resistanssi lampun palaessa, jolloin langan lämpötila on 2 100 °C?

1-36. Metallin resistiivisyyden lämpötilakerroin määritettiin lämmittämällä ohuesta langasta valmistettua kelaa parafiiniöljyhauteessa ja mittaamalla samanaikaisesti vastusmittarilla kelan resistanssia. Koe antoi seuraavan tuloksen:

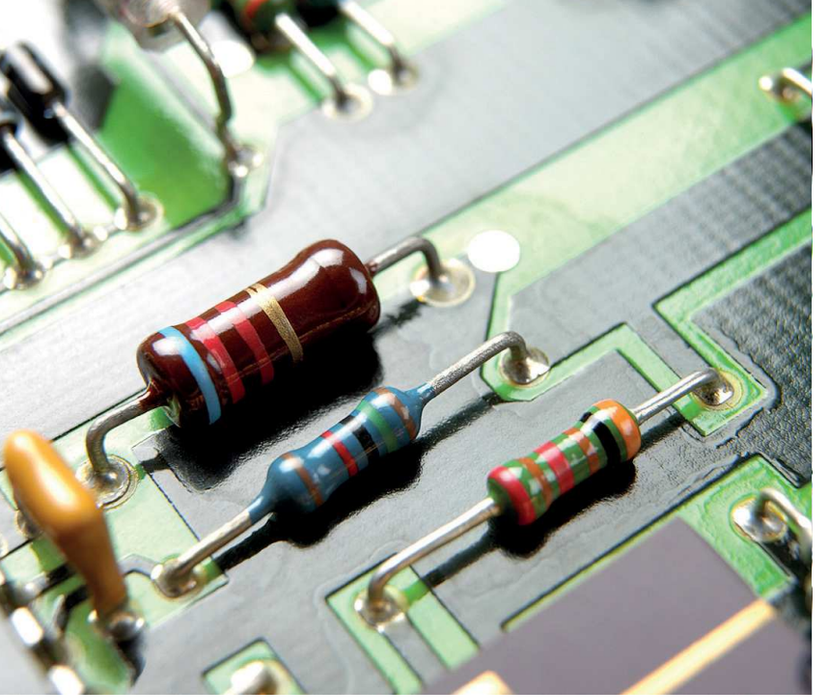
t/°C	21,8	39,0	51,8	66,3	80,1	93,2
R/Ω	17,5	18,6	19,6	20,7	21,7	22,5

Määritä graafista esitystä hyväksi käyttäen metallin resistiivisyyden lämpötilakerroin.

1-37. Ihmisen hermosolu (neuroni) voidaan ajatella pitkäksi säikeeksi (lieriöksi). Hermosolun pituus on 25 cm, halkaisija noin 10 μm ja resistanssi noin 2 GΩ.
a) Laske neuronin solunesteen resistiivisyys ja vertaa sitä veden resistiivisyyteen.
b) Selvitä hermosolun rakennetta.



Ihmisen hermosoluja.



1.4 Vastusten kytkennät

Sähkölaitteiden virtapiireissä käytetään komponentteja, joilla kullakin on tietty resistanssi. Näitä komponentteja kutsutaan vastuksiksi. Kiinteiden vastusten resistanssilla on vakioarvo, mutta säätövastusten resistanssia voi tarvittaessa muuttaa. Monen valaisimen valaistusta voikin säätää säätövastuksen avulla.

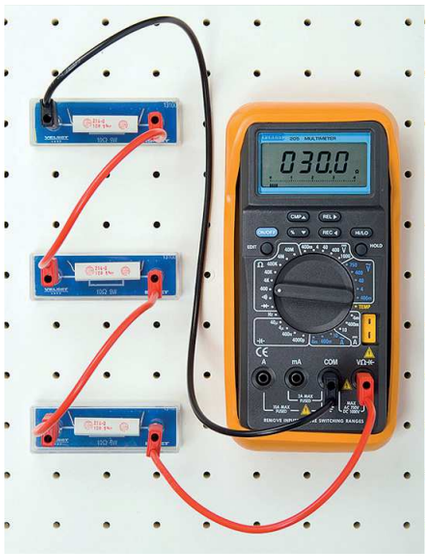
Vastuksia voidaan kytkeä kahdella tavalla: rinnan ja sarjaan. Virtapiireissä on usein näiden kytkentätyyppien yhdistelmiä. Esimerkiksi elektroniikkateollisuuden tarpeisiin valmistetaan tietynsuuruisia vastuksia. Joskus sähkölaitetta rakennettaessa tarvitaan vastus, jota ei ole saatavilla valmiina. Silloin voidaan käyttää säätövastusta tai vastus kootaan kytkemällä sopivasti vastuksia, jotka ovat saatavilla.

Sarjakytkentä

Oppilastyö ▪ Sarjakytkentä

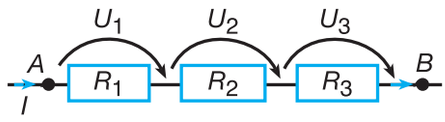
1. Kytke pieni lamppu paristoon. Tarkkaile lampun kirkkautta. Kytke tämän jälkeen samaan paristoon sarjaan (peräkkäin) vähintään kaksi lamppua. Miten lamppujen lisäys vaikuttaa lamppujen kirkkauteen?

2. Mittaa yleismittarilla kolmen erillisen vastuksen resistanssit. Kytke kaksi vastuksista sarjaan ja mittaa koko vastusyhdistelmän resistanssi. Vertaa yhdistelmän resistanssia yksittäisten vastusten resistanssiin. Toista koe kytkemällä kolme vastusta sarjaan.

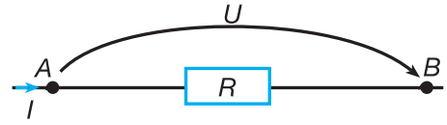


Oppilastyön ensimmäisessä osassa todetaan, että mitä useampi lamppu paristoon kytketään, sitä himmeämmin lamput palavat. Koska lamppujen läpi kulkeva sähkövirta pienenee, yhtälöstä $R = \frac{U}{I}$ voidaan päätellä, että lamppuyhdistelmän resistanssin täytyy olla suurempi kuin yksittäisen lampun resistanssi.

Oppilastyön toisessa osassa havaitaan, että vastusten sarjakytkennässä vastusyhdistelmän kokonaisresistanssi on suurempi kuin yksittäisen vastuksen resistanssi. Oppilastyössä vastusten resistanssit olivat 10 Ω, 10 Ω ja 10 Ω, joten sarjaan kytketyn yhdistelmän resistanssiksi saadaan 30 Ω. Vastusyhdistelmän **kokonaisresistanssi** on siis yksittäisten **vastusten resistanssien summa**.



Vastukset sarjaan kytkettynä.



R on korvaavan vastuksen resistanssi

Piirros esittää sarjaan kytkettyjä vastuksia, joiden resistanssit ovat R_1, R_2 ja R_3. Määritetään sen vastuksen resistanssi, joka korvaa annettujen vastusten yhdistelmän. Kytketään vastusyhdistelmä jännitteeseen U, jolloin kunkin vastuksen läpi kulkee sama virta I. Oletetaan, että sähköjohtimissa ei tapahdu jännitehäviötä. Vastuksissa tapahtuvat jännitehäviöt ovat $U_1 = R_1 I$, $U_2 = R_2 I$ ja $U_3 = R_3 I$. Korvaavassa vastuksessa tapahtuva jännitehäviö $U = RI$.

Koska yhdistelmän jännitehäviö on vastuksissa tapahtuvien jännitehäviöiden summa, saadaan yhtälö $U = U_1 + U_2 + U_3$ eli $RI = R_1 I + R_2 I + R_3 I$. Kun edellinen yhtälö jaetaan puolittain sähkövirralla I, saadaan $R = R_1 + R_2 + R_3$.

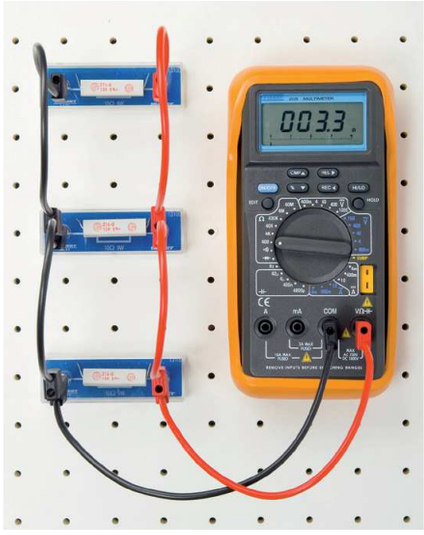
Vastusten sarjakytkentä

Vastusten sarjakytkennässä vastusyhdistelmän kokonaisresistanssi R saadaan laskemalla yhteen yksittäisten vastusten resistanssit:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n = \sum R_i.$$

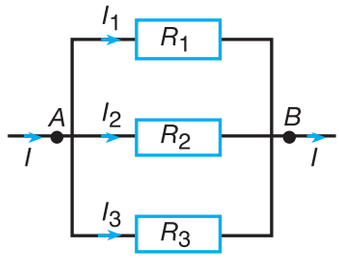
Rinnankytkentä

Oppilastyö ▪ Rinnankytkentä
Mittaa yleismittarilla kolmen vastuksen resistanssit. Kytke ensin kaksi vastusta rinnakkain (rinnankytkentä) ja mittaa koko vastussysteemin resistanssi. Vertaa vastusyhdistelmän resistanssia yksittäisten vastusten resistanssiin. Toista koe käyttäen kolmea vastusta.

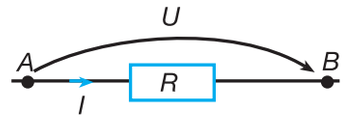


Oppilastyössä havaitaan, että kun vastuksia kytketään rinnan, vastusyhdistelmän resistanssi on pienempi kuin yksittäisten vastusten resistanssi. Oppilastyössä vastusten resistanssit ovat 10 Ω, 10 Ω ja 10 Ω, jolloin rinnan kytketyn kolmen vastuksen yhdistelmän resistanssi on noin 3,3 Ω. Rinnan kytkettyjen vastusten kokonaisresistanssi on aina kytkennän jokaisen vastuksen resistanssia pienempi.

Kuva esittää rinnan kytkettyjä vastuksia, joiden resistanssit ovat R_1, R_2 ja R_3. Määritetään tätä vastusyhdistelmää korvaavan vastuksen resistanssi R.



Vastukset rinnan kytkettynä.



R on korvaavan vastuksen resistanssi.

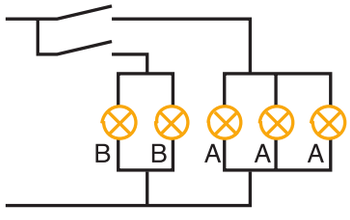
Kytketään vastusten yhdistelmä jännitteeseen U, jolloin kunkin vastuksen päiden välinen jännite on sama U. Oletetaan, että sähköjohtimissa ei tapahdu jännitehäviötä. Vastuksien läpi kulkevat sähkövirrat ovat $I_1 = \frac{U}{R_1}$, $I_2 = \frac{U}{R_2}$ ja $I_3 = \frac{U}{R_3}$. Korvaavan vastuksen läpi kulkeva sähkövirta on $I = \frac{U}{R}$.

Kirchhoffin 1. lain (ks. sivu 15) mukaan haarautumispisteeseen tulevien sähkövirtojen summa on yhtä suuri kuin siitä lähtevien sähkövirtojen summa eli $I = I_1 + I_2 + I_3$. Kun sähkövirrat $I = \frac{U}{R}$, $I_1 = \frac{U}{R_1}$, $I_2 = \frac{U}{R_2}$ ja $I_3 = \frac{U}{R_3}$ sijoitetaan yhtälöön $I = I_1 + I_2 + I_3$, saadaan $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$. Kun edellinen yhtälö jaetaan puolittain jännitteellä U, saadaan $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$.

Vastusten rinnankytkentä

Vastusten rinnankytkennässä vastusyhdistelmän kokonaisresistanssin R käänteisluku saadaan laskemalla yhteen yksittäisten vastusten resistanssien käänteisluvut:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n} = \sum \frac{1}{R_i}.$$



Valaisinsysteemeissä käytetään rinnankytkentää. Jos yksi lamppu menee rikki, muut lamput valaisevat vielä.

Esimerkki 7

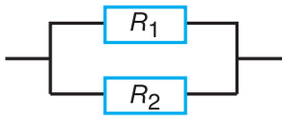
Vastusten resistanssit ovat 25 kΩ ja 45 kΩ.
a) Laske yhdistelmän kokonaisresistanssi, kun vastukset ovat sarjassa.
b) Laske yhdistelmän kokonaisresistanssi, kun vastukset ovat rinnan.
c) Sarjaan kytketyt vastukset liitetään 23 V:n jännitteeseen. Laske virtapiirissä kulkeva sähkövirta.

$R_1 = 25\ \text{k}\Omega, \quad R_2 = 45\ \text{k}\Omega, \quad U = 23\ \text{V}$

a) Sarjakytkennässä vastusten yhdistelmän kokonaisresistanssi on

$$R = R_1 + R_2 = 25\ \text{k}\Omega + 45\ \text{k}\Omega = 70\ \text{k}\Omega.$$

Yhdistelmän kokonaisresistanssi on 70 kΩ.

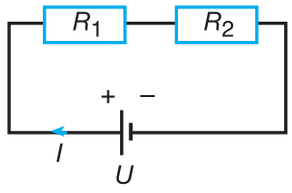


b) Rinnan kytkettyjen vastusten kokonaisresistanssi saadaan seuraavasti: Lavennetaan yhtälö $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ muotoon $\frac{1}{R} = \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2}$ ja edelleen $\frac{1}{R} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$.

Tästä saadaan kokonaisresistanssiksi

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{25\ \text{k}\Omega \cdot 45\ \text{k}\Omega}{25\ \text{k}\Omega + 45\ \text{k}\Omega} \approx 16\ \text{k}\Omega.$$

Vastusyhdistelmän kokonaisresistanssi on 16 kΩ.

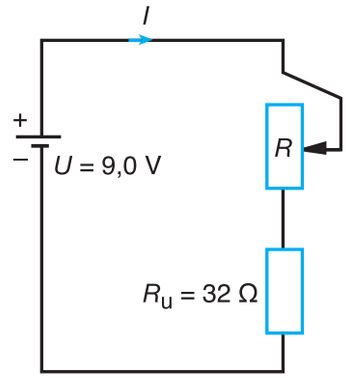


c) Virtapiirissä kulkevan sähkövirran suuruus on

$$I = \frac{U}{R} = \frac{23\ \text{V}}{25\ \text{k}\Omega + 45\ \text{k}\Omega} = \frac{23\ \text{V}}{70\ \text{k}\Omega} \approx 0{,}33\ \text{mA}.$$

Sähkövirta on 0,33 mA.

Esimerkki 8



Säätövastuksen (potentiometrin) avulla voidaan säätää virtapiirissä kulkevaa sähkövirtaa. Säätövastus kytketään sarjaan ulkoisen laitteen, kuten toisen vastuksen, kanssa. Kuvan kytkennässä säätövastuksen resistanssia voidaan säätää 25 Ω:n ja 150 Ω:n välillä. Ulkoisen vastuksen resistanssi on 32 Ω. Vastukset kytketään 9,0 V:n jännitteeseen. Millä välillä piirissä kulkeva sähkövirta voi vaihdella?

$U = 9{,}0\ \text{V}, \quad R_\text{u} = 32\ \Omega$

Koska kuvan kytkennässä vastukset ovat sarjassa, niiden yhdistelmän kokonaisresistanssi voi vaihdella välillä
$R_\text{min} = R_\text{u} + R_\text{säätö, min} = 32\ \Omega + 25\ \Omega = 57\ \Omega$ ja
$R_\text{max} = R_\text{u} + R_\text{säätö, max} = 32\ \Omega + 150\ \Omega = 182\ \Omega$.

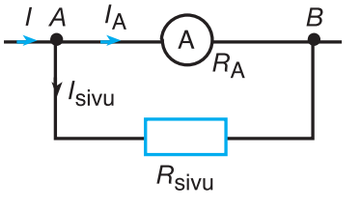
Pienin piirissä kulkeva sähkövirta on

$$I = \frac{U}{R_\text{max}} = \frac{9{,}0\ \text{V}}{182\ \Omega} \approx 49\ \text{mA}$$

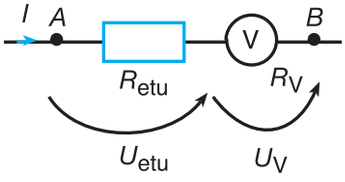
ja suurin

$$I = \frac{U}{R_\text{min}} = \frac{9{,}0\ \text{V}}{57\ \Omega} \approx 160\ \text{mA}.$$

Sähkövirta voi vaihdella 49 mA:n ja 160 mA:n välillä.



Suurten sähkövirtojen mittaaminen voi rikkoa ampeerimittarin, koska sähkövirta kulkee aina mittarin läpi. Ampeerimittarin käyttöaluetta voi laajentaa mittarin kanssa rinnan kytkettävän sivuvastuksen avulla. Tällöin mitattava sähkövirta jakautuu mittarin ja sivuvastuksen kesken. Ampeerimittarin sivuvastus on sitä pienempi, mitä suurempia sähkövirtoja mittarilla halutaan mitata.

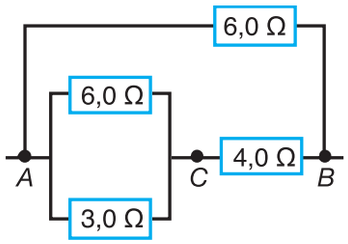


Volttimittarin käyttöaluetta voi laajentaa etuvastuksella, joka kytketään sarjaan mittarin kanssa. Kun etuvastuksen resistanssi on suuri, suurin osa jännitehäviöstä tapahtuu siinä ja volttimittarissa tapahtuu vain pieni jännitehäviö. Säädettävän etuvastuksen resistanssia suurentamalla saadaan pienennettyä sähkövirtaa. Tällöin mittarin ja vastuksen läpi kulkee sama sähkövirta.

Tehtäviä

1-38. Vastukset, joiden resistanssit ovat 25 Ω ja 35 Ω, kytketään
a) sarjaan b) rinnan.
Laske yhdistelmän kokonaisresistanssi.

1-39. Laske kuvan tietojen nojalla resistanssi välillä *AB*.

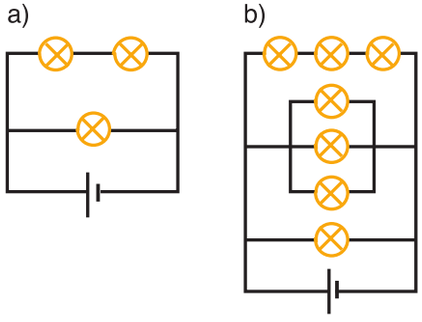


1-40. Käytettävissä on kolme vastusta, joiden kunkin resistanssi on 580 Ω. Millä eri tavoilla ne voidaan kytkeä niin, että kaikkia vastuksia käytetään? Kuinka suuri on kunkin kytkennän resistanssi?

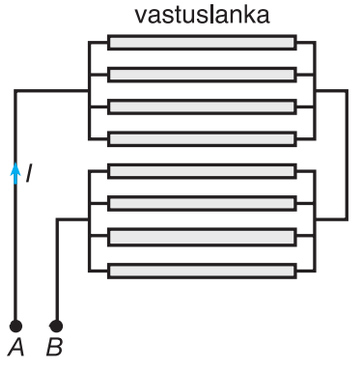
1-41. Käytettävissä on kaksi 1,2 kΩ:n vastusta ja yksi 2,5 kΩ:n vastus. Millä tavalla vastukset tulisi kytkeä, jotta vastusyhdistelmän resistanssi olisi 2,0 kΩ?

1-42. Ulkovalosarjassa on 10 lamppua sarjassa. Jokaisen lampun resistanssi on 25 Ω. Kuinka suuri sähkövirta valosarjassa kulkee, kun lamput kytketään 24 V:n jännitteeseen?

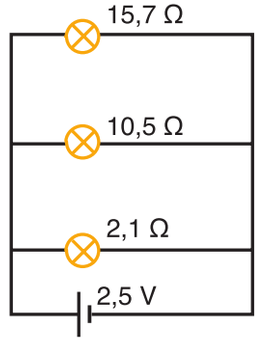
1-43. Lamput ovat samanlaisia. Mikä lamppu palaa kirkkaimmin ja mikä himmeimmin? Perustele näkemyksesi.



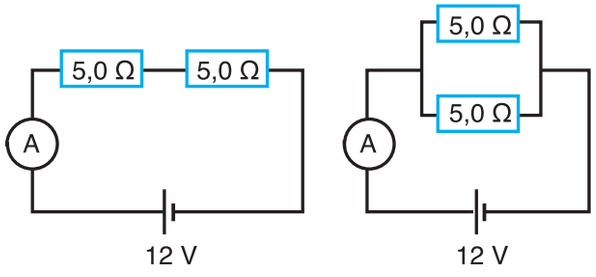
1-44. Auton takalasinlämmitin koostuu kahdeksasta ikkunaan kiinnitetystä vastuslangasta, joista kunkin resistanssi on 6,5 Ω. Langat on kytketty toisiinsa kuvan mukaisesti. Muiden kytkentäjohtimien resistanssi on pieni. Laske sähkövirran *I* suuruus. Auton akusta saadaan pisteiden *A* ja *B* väliseksi jännitteeksi 12 V.



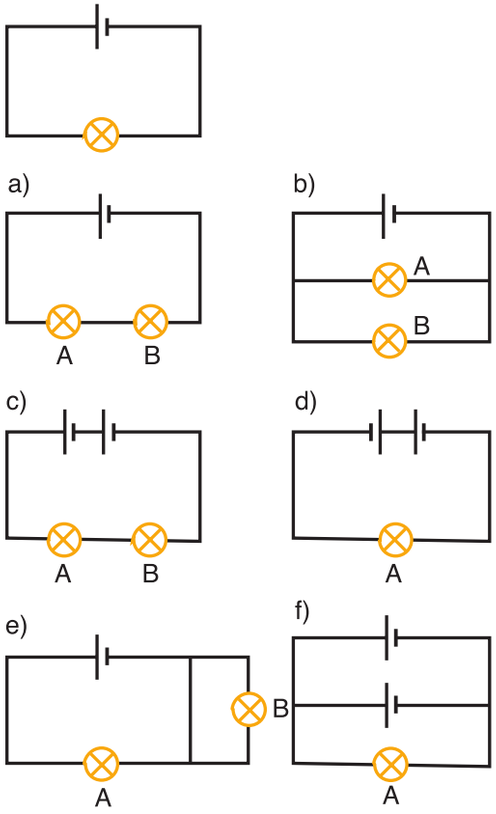
1-45. Laske kunkin lampun läpi kulkevan virran suuruus.



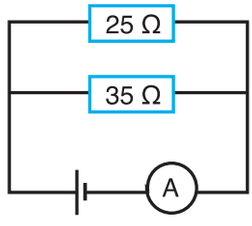
1-46. Mitkä ovat ampeerimittarien lukemat oheisissa virtapiireissä?



1-47. Ilmoita, palaako kukin kuvaan merkitty lamppu kirkkaammin, himmeämmin vai yhtä kirkkaasti kuin ensimmäisessä piirissä oleva lamppu. Kaikki lamput ovat keskenään samanlaisia, samoin paristot.

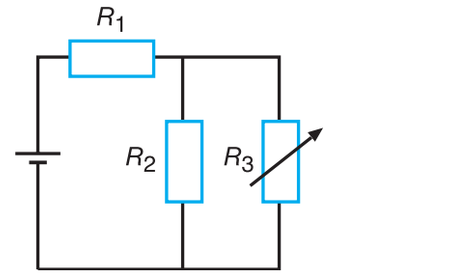


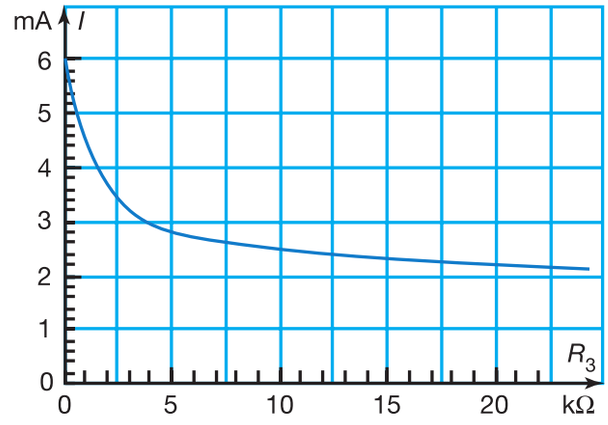
1-48. Kaksi rinnan kytkettyä vastusta, joiden resistanssit ovat 25 Ω ja 35 Ω, yhdistetään jännitelähteeseen. Ampeerimittari, joka on kytketty jännitelähteeseen, näyttää arvoa 0,45 A. Laske jännitelähteen jännite.



1-49. Johtimena käytetään teräslankaa, jonka halkaisija on 3,0 mm ja joka on päällystetty 150 μm:n paksuisella kuparikerroksella. Kuinka suuri jännitehäviö on 420 m:n pituisessa johtimessa, jossa kulkee 3,5 A:n tasavirta? Teräksen resistiivisyys on $18{,}4 \cdot 10^{-8}$ Ωm ja kuparin $1{,}68 \cdot 10^{-8}$ Ωm. [S2002, 7]

1-50. Jännitelähde ($U = 12$ V) kytketään kuvan mukaisella tavalla kahden vastuksen ja yhden säätövastuksen kanssa virtapiiriksi. Kun säätövastuksen resistanssia suurennetaan, virta paristossa pienenee kuvaajan mukaisesti kohti arvoa 2,0 mA. Määritä vastusten 1 ja 2 resistanssit.

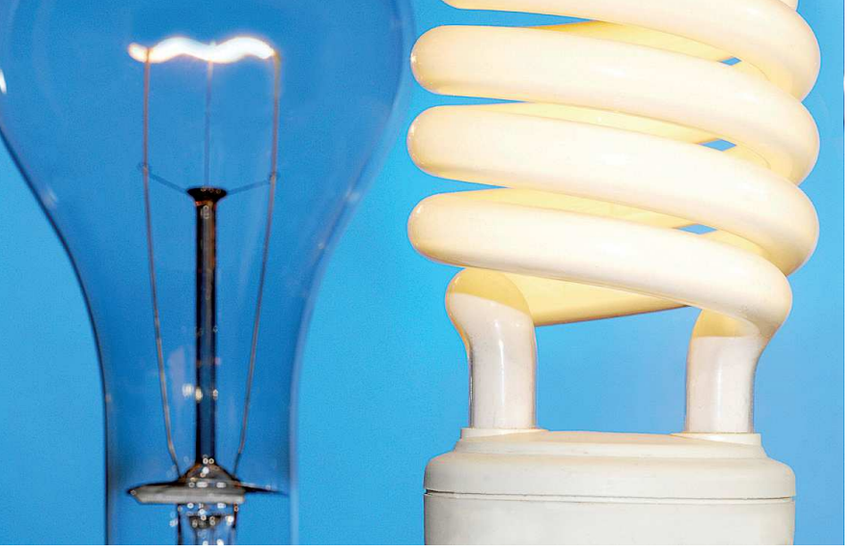




1-51. Ampeerimittari, jonka resistanssi on 65 Ω, antaa täyden poikkeaman 210 mA:n sähkövirralla.

a) Kuinka suuri sivuvastus tarvitaan, kun halutaan mitata sähkövirtoja 6,0 A:iin saakka?

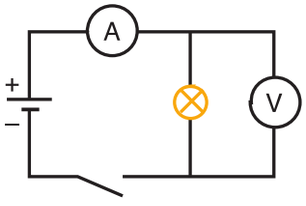
b) Kuinka suuri etuvastus tarvitaan, kun samaa mittaria käytetään jännitteiden mittaukseen 115 V:iin saakka?



Energiansäästölamppu, jonka teho on 11 W, valaisee yhtä hyvin kuin 60 W:n hehkulamppu mutta kuluttaa huomattavasti vähemmän energiaa. Led-valaisimien käyttöikä on pitkä ja ylläpitokustannukset ovat alhaiset.

1.5 Joulen laki

Sähkön avulla voidaan tuottaa esimerkiksi valoa mutta myös helpottaa monia työsuorituksia. Ruuvin ruuvaaminen seinään on helpompaa akkuporakoneen avulla kuin vääntämällä ruuvimeisselillä. Porakoneen – kuten myös monien hiustenkuivaajien – tehoa voi tarpeen mukaan säätää. Porakoneen käyttöjännite on aina sama riippumatta tehosta, jolla sitä käytetään: tehoa säädettäessä laitteen sähkövirta muuttuu.



Oppilastyö ▪ Hehkulampun sähköteho

Tee kuvan kytkentä käyttäen säädettävää jännitelähdettä. Sulje virtapiiri kytkimellä ja lue hehkulampussa kulkeva sähkövirta ampeerimittarista ja lampussa tapahtuva jännitehäviö volttimittarista. Taulukoi mittaustulokset ja laske lampun läpi kulkevan sähkövirran ja lampussa tapahtuvan jännitehäviön tulo. Toista mittaukset käyttäen erilaista jännitettä.

Oppilastyön mittaustulokset taulukoitiin:

U/V	I/A	$U \cdot I$/VA
1,5	0,24	0,36
3,4	0,57	1,938
4,9	0,88	4,312
6,0	1,25	7,5
6,5	1,33	8,645

Oppilastyön tuloksista voidaan päätellä, että hehkulampun jännitehäviön ja lampun läpi kulkevan sähkövirran tulo on sitä suurempi, mitä suurempi on jännitehäviö ja lampun läpi kulkeva sähkövirta. Lisäksi havaitaan, että jännitehäviön ja sähkövirran tulo riippuu jännitehäviön ja sähkövirran suuruuksista.

Laitteen sähköteho
Laitteen sähköteho P on suoraan verrannollinen laitteen jännitehäviöön U ja laitteen läpi kulkevaan sähkövirtaan I:

$$P = UI.$$

Sähkötehon yksikkö on $[P] = [U][I] = 1\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} = 1\ \text{VA} = 1\ \text{W}$ (watti).

Laitteen sähköteholla voidaan tarkoittaa asiayhteydestä riippuen laitteen kuluttamaa tai tuottamaa tehoa.

Jos virtapiiriin kytketyn laitteen resistanssi on R, laitteen läpi kulkeva sähkövirta I ja laitteessa tapahtuva jännitehäviö U, laitteessa kuluva sähköteho $P = UI$ voidaan kirjoittaa muotoon $P = UI = RI \cdot I = RI^2$. Tämä tunnetaan Joulen lakina. *James Joule* (1818–1889) oli englantilainen fyysikko.

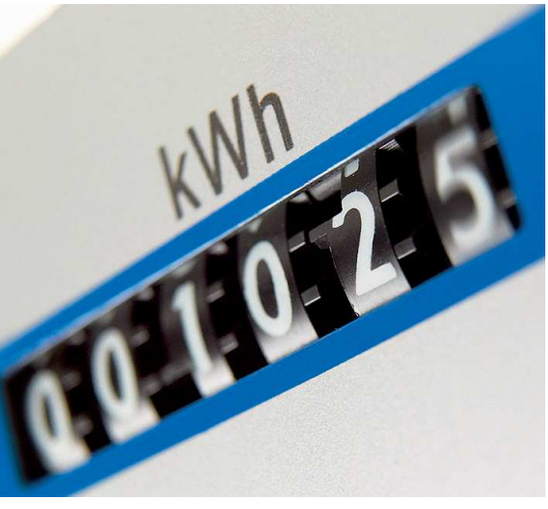
Joulen laki
Vastus (tai laite), jonka resistanssi on R ja jonka läpi kulkee sähkövirta I, kuluttaa virtapiirissä energiaa teholla

$$P = RI^2.$$

Vastus (tai laite) myös tuottaa energiaa tällä teholla.

Sähköteholle saadaan myös muoto $P = UI = U \cdot \dfrac{U}{R} = \dfrac{U^2}{R}$.

Kodin sähkönkulutusta seurataan kilowattituntimittarilla ja energian yksikkönä käytetään kilowattituntia, kWh.



Voimalaitoksilta siirretään sähkön avulla energiaa kuluttajille. Siirretty energia muunnetaan sähkölaitteissa – esimerkiksi valoksi erilaisissa valaisimissa. Sähkölaitteen kuluttama energia riippuu laitteen sähkötehosta ja laitteen käyttöajasta.

Sähkölaitteen kuluttama energia
Sähkölaitteen kuluttama energia on

$$E = Pt = UIt,$$

jossa P on laitteen sähköteho ja t käyttöaika.

Esimerkki 9

Hiustenkuivaajassa on merkintä 1100 W/230 V.
a) Mitä merkintä tarkoittaa?
b) Laske kuivaajassa olevan vastuslangan resistanssi, kun 85 % kuivaajan sähkötehosta kuluu vastuslangan lämmittämiseen.

a) Merkinnässä 1100 W/230 V kuivaajan sähköverkosta ottama sähköteho on 1100 W ja käyttöjännite 230 V.

b) Yhtälöstä $P = \frac{U^2}{R}$ saadaan vastuslangan resistanssiksi

$$R = \frac{U^2}{\eta P_{\text{otto}}} = \frac{U^2}{0{,}85 \cdot P_{\text{otto}}} = \frac{(230\ \text{V})^2}{0{,}85 \cdot 1\,100\ \text{W}} \approx 57\ \Omega.$$

Hiustenkuivaajan vastuslangan resistanssi on 57 Ω.

Esimerkki 10

Oppilastyössä määritettiin vedenkeittimen sähköteho. Oppilaat kuumensivat 2,0 dl vettä kiehuvaksi vedenkeittimessä. Tähän kului aikaa 43 sekuntia. Veden alkulämpötila oli 8,5 °C. Vedenkeittimen veden lämmityksen hyötysuhde on 0,90. Laske vedenkeittimen sähköteho.

$m = 0{,}20\ \text{kg}, \quad t = 43\ \text{s}, \quad \Delta\theta = 100\ ^\circ\text{C} - 8{,}5\ ^\circ\text{C} = 91{,}5\ ^\circ\text{C},$
$\Delta T = 91{,}5\ \text{K}, \quad c = 4{,}19\ \text{kJ/(kgK)}, \quad \eta = 0{,}90$

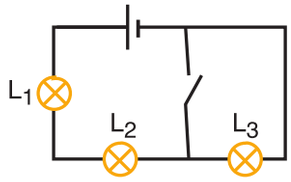
Jos lämpöhäviöt ovat pienet, luovutettu ja vastaanotettu energia ovat yhtä suuret. Vedenkeittimen sähkövastuksen luovuttama energia siirtyy kokonaan veteen, eli $Q_{\text{vedenkeitin}} = Q_{\text{vesi}}$. Jos kuumentamiseen käytetty aika on t ja lämmityksen hyötysuhde η, saadaan yhtälö $\eta P t = cm\Delta T$. Sähköteho on

$$P = \frac{cm\Delta T}{\eta t} = \frac{4{,}19\ \text{kJ/(kgK)} \cdot 0{,}20\ \text{kg} \cdot 91{,}5\ \text{K}}{0{,}90 \cdot 43\ \text{s}} \approx 2{,}0\ \text{kW}.$$

Vedenkeittimen sähköteho on 2,0 kW.

1-52. a) Televisiot ja monet muut elektroniikkalaitteet kuluttavat sähköä valmiustilassa, vaikka niitä ei käytetä. Kodin elektroniikkalaitteet ovat keskimäärin ¾ ajasta valmiustilassa, jolloin ne kuluttavat energiaa yhteensä 45 W:n teholla. Kuinka paljon kotitalous voi vuodessa säästää sähkölaskussa, jos valmiustilassa olevat elektroniikkalaitteet sammutetaan? Sähkön hinta on 0,10 €/kWh.
b) Mainitse muita käyttökelpoisia tapoja pienentää kotien energiankulutusta. [K2010, 1]

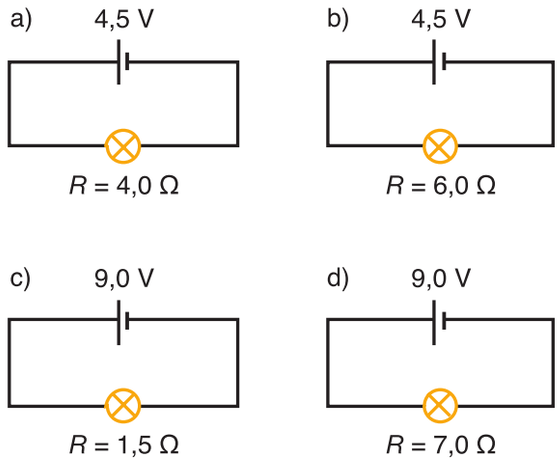
1-53. Kuvan kytkennän hehkulamput ovat samanlaiset.



Kun kytkin suljetaan, miten muuttuu
a) lampun L_1 kirkkaus
b) lampussa L_2 tapahtuva jännitehäviö
c) tehohäviö lampussa L_2?

1-54. a) Tavallinen 60 W:n hehkulamppu kytketään verkkojännitteeseen, jonka suuruus on 230 V. Laske hehkulangassa kulkevan sähkövirran suuruus ja lampun resistanssi.
b) Elektroniikan rakennussarjassa on vastus, jonka resistanssi on 5,0 kΩ. Se kestää 0,50 W:n sähkötehon. Mikä on suurin jännite, johon vastus voidaan kytkeä?

1-55. Mikä lampuista palaa kirkkaimmin?



1-56. Sähkölieden levyn katkaisijasta voidaan valita levylle erilaisia sähkötehoja. Levyssä on kolme vastusta, joiden resistanssit ovat 100 Ω, 150 Ω ja 150 Ω. Vastusten kytkennät muuttuvat, kun katkaisijaa käännetään. Katkaisijan asennossa 1 sähköteho on 0,21 kW ja asennossa 6 teho on 1,3 kW. Sähköliesi on kytketty verkkojännitteeseen, jonka suuruus on 230 V.
a) Kuinka suuri sähkövirta vastuksissa näissä tapauksissa kulkee?
b) Millaisesta vastusten kytkennästä on kyse?

1-57. Sähkömoottori pumppaa 30 minuutissa 15 m^3 vettä 15 m:n korkeudelle. Pumppu on kytketty 395 V:n jännitteeseen, ja pumpun hyötysuhde on 0,65. Laske pumpussa kulkeva sähkövirta.

1-58. Kerrostaloasuntoon aiotaan rakentaa sauna.
a) Kuinka suuri kiukaan sähköteho voi olla, jos kiuas kytketään tavalliseen 230 V:n jännitteeseen ja kiuasta varten voidaan asentaa 16 A:n sulake?
b) Laske, millaisen lisäyksen kiuas aiheuttaa sähkölaskuun, jos kiuasta lämmitetään kaksi kertaa viikossa 2,5 tuntia kerrallaan.

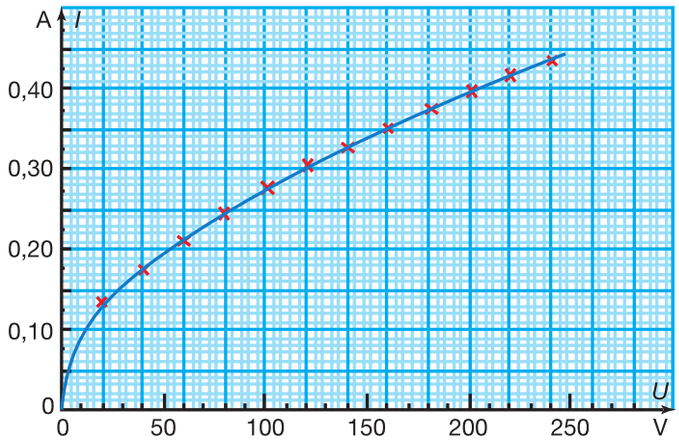
1-59. Vedenlämmittimen teho on 350 W. Lumesta syntynyt vesi lämmitetään kiehuvaksi. Veden lämpenemisen hyötysuhde on 0,85 ja lämmitysaika 15 minuuttia. Laske veden massa.

1-60. Pienen uppokuumentimen avulla sulatetaan 1,0 kg 0-celsiusasteista jäätä. Uppokuumentimen sähköteho on 1,0 kW ja sulattamisen hyötysuhde 88 %. Kuinka kauan sulatus kestää?

1-61. Kahden vastuksen ($R_1 = 3{,}0\,\Omega$, $R_2 = 6{,}0\,\Omega$) muodostama vastusyhdistelmä kytketään pariston napoihin. Pariston sisäinen vastus on häviävän pieni ja lähdejännite 18,0 V. Määritä kunkin vastuksen läpi kulkeva virta, jännitehäviö kussakin vastuksessa ja tehonkulutus kussakin vastuksessa, jos vastukset on kytketty
a) sarjaan b) rinnan.
[Joensuun yliopisto 2004]

1-62. Kaksi hehkulamppua, joiden resistanssit ovat $R_1 = R_2 = 1{,}3\,\Omega$, kytketään paristoon, jonka napajännite on $U = 1{,}5$ V. Oleta, että lamppujen resistanssit ja pariston napajännite ovat vakioita.
a) Perustele, miten hehkulamput on kytkettävä pariston kanssa, jotta ne palavat mahdollisimman kirkkaasti. Piirrä kytkentä.
b) Laske tehohäviö toisessa lampuista, kun lampun kirkkaus on mahdollisimman suuri.
[TKK 2004]

1-63. Erään 100 watin hehkulampun virta riippuu jännitteestä kuvan mukaisesti.
a) Miksi kuvaaja ei ole suora?
b) Esitä graafisesti lampun kuluttama sähköteho jännitteen funktiona.
c) Verkkojännitteeseen (230 V) kytketyn lampun tehonkulutusta pienennetään etuvastuksella. Kuinka suuri on etuvastuksen resistanssi, kun lamppu kuluttaa 65 W:n tehon? [K2003, 7]



1-64. Veden höyrystymislämpö mitattiin uppokuumentimen avulla. Muodostunut höyry tiivistetään vedeksi jäähdyttimessä ja punnitaan. Kokeessa käytettiin neljää eri kuumennustehoa, ja kussakin tapauksessa mitattiin 6,0 minuutin aikana höyrystyneen vesimäärän massa. Tulokset ovat oheisessa taulukossa. *Opastus*: Lämmitystehoa kuluu veden höyrystämisen lisäksi laitteiston lämpöhäviöihin, jotka pysyvät vakiona koko mittauksen ajan. [S1989, 11]

U/V	*I*/A	*m*/g
160	1,52	25,6
180	1,70	36,2
200	1,87	46,2
220	2,06	58,9

Määritä sopivaa graafista esitystä hyväksi käyttäen
a) veden ominaishöyrystymislämpö
b) mittauksessa tapahtunut lämpöhäviö.

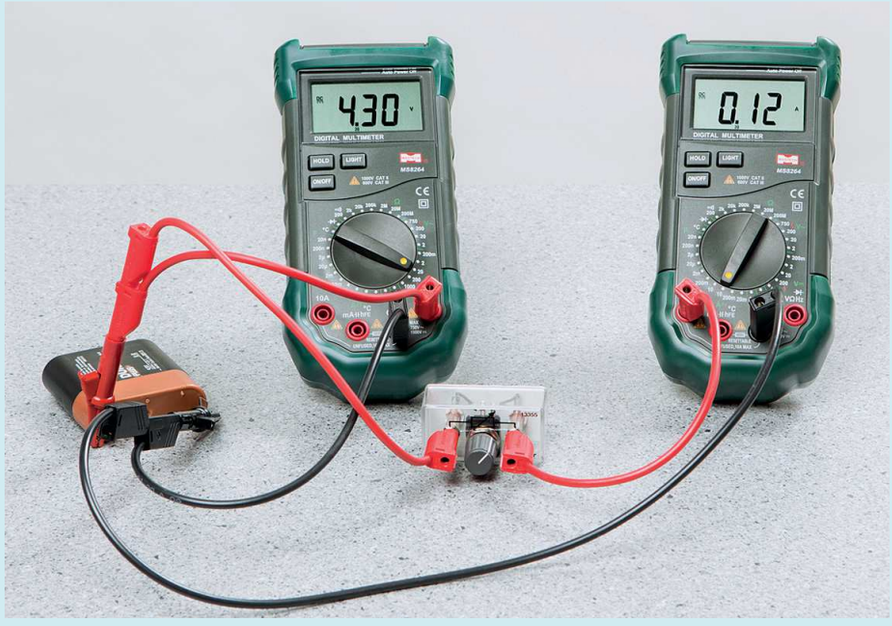
1.6 Paristot

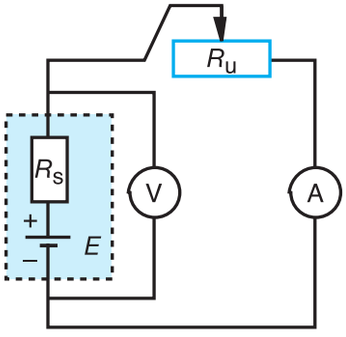
Pariston napajännite

Oppilastyö ▪ Pariston kuormituskäyrä

1. Mittaa kuormittamattoman pariston napajännite. Kytke lamppu paristoon ja mittaa uudelleen pariston jännite. Mitä havaitset?

2. Rakenna kuvan mukainen kytkentä. Tutki pariston napajännitteen U riippuvuutta piirissä kulkevasta sähkövirrasta I. Muuta piirissä kulkevaa sähkövirtaa ulkoisella säätövastuksella, jonka resistanssi on R_u. Taulukoi mittaustulokset ja esitä ne (I, U)-koordinaatistossa.



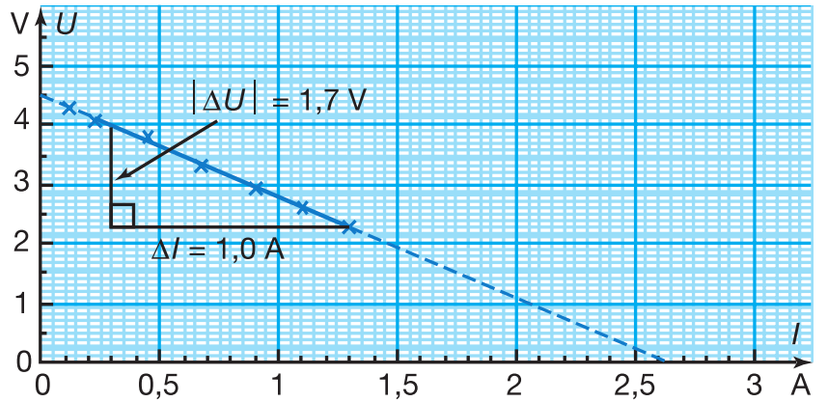


I/A	U/V
0,12	4,30
0,22	4,07
0,45	3,80
0,68	3,31
0,90	2,92
1,10	2,59
1,30	2,28

Oppilastyön ensimmäisessä osassa havaittiin, että kun lamppu kytkettiin paristoon eli paristoa kuormitettiin, pariston napajännite pieneni hieman. Lähdejännite E on kuormittamattoman pariston napojen välinen jännite. Napajännite U on kuormitetun pariston napojen välinen jännite.

Oppilastyön toisessa osassa havaittiin, että vaikka käytetty paristo oli koko ajan sama, pariston napajännite muuttui piirissä olevan kuormituksen mukaan. Kun mittaustulokset siirretään (I, U)-koordinaatistoon, mittauspisteet näyttäisivät asettuvan mittaustarkkuuden rajoissa peräkkäin. Sovitetaan pistejoukkoon suora.

Oppilastyön mittauksessa pariston lähdejännite on 4,5 V, sisäinen resistanssi 1,7 Ω ja oikosulkuvirta 2,6 A.



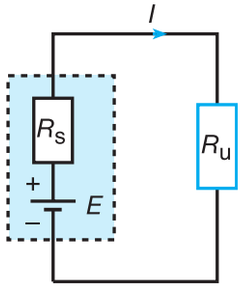
Kuvaajasta voidaan päätellä, että pariston napojen välinen jännite muuttuu sähkövirran muuttuessa pariston sisäisessä resistanssissa R_s tapahtuvan jännitehäviön takia. Pariston lähdejännite E saadaan ekstrapoloimalla U-akselin leikkauskohta: sähkövirta $I = 0$ A, ja pariston läpi ei kulje sähkövirtaa.

Suurin piirissä kulkeva sähkövirta saataisiin oikosulkemalla sähköpari – tätä virtaa kutsutaan oikosulkuvirraksi (I_0). Tällöin ulkoinen vastus olisi nolla ja paristoa kuormittaisi ainoastaan pariston sisäinen resistanssi. Oikosulkuvirta voidaan määrittää kuvaajasta ekstrapoloimalla I-akselin leikkauskohta. Oikosulkuvirta saadaan myös laskettua yhtälöstä $I_0 = \dfrac{E}{R_s}$.

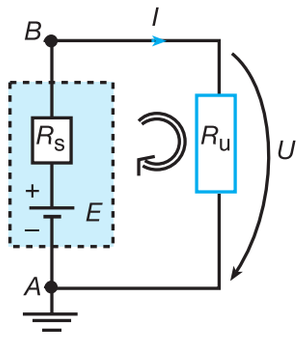
(I, U)-koordinaatistoon piirrettyä suoraa kutsutaan pariston **kuormituskäyräksi**. Kuormituskäyrän $U = E - R_s I$ fysikaalisen kulmakertoimen itseisarvo on pariston sisäinen resistanssi R_s.

Oppilastyössä käytetyn pariston sisäinen resistanssi on

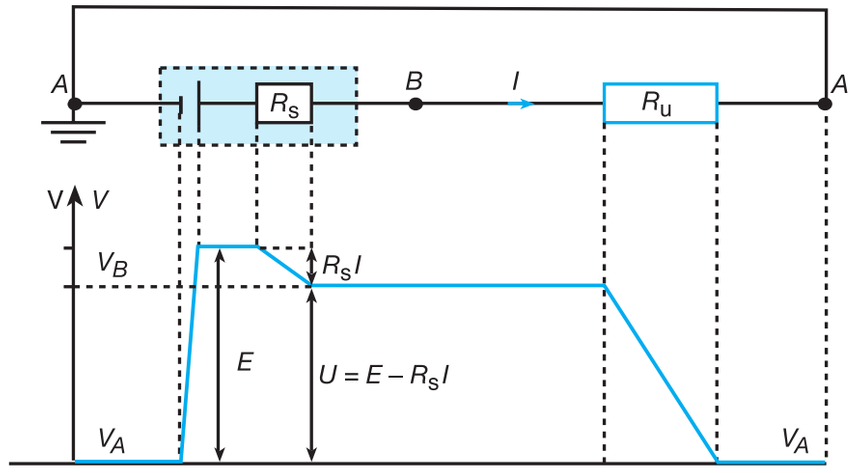
$$R_s = \left|\frac{\Delta U}{\Delta I}\right| = \frac{|2{,}3\ \text{V} - 4{,}0\ \text{V}|}{|1{,}3\ \text{A} - 0{,}3\ \text{A}|} = \frac{1{,}7\ \text{V}}{1{,}0\ \text{A}} = 1{,}7\ \Omega.$$



Kuvan virtapiirissä olevan jännitelähteen, kuten sähköparin tai pariston, lähdejännite on E. Sen napoihin on kytketty ulkoinen vastus, jonka resistanssi on R_u. Ulkoista vastusta kutsutaan usein virtapiirin kuormaksi. Jännitelähteen sisäinen resistanssi on R_s. Virta I kulkee myös jännitelähteen läpi ja aiheuttaa siinä jännitehäviön $R_s I$.



Tarkastellaan edelleen kuvan suljettua virtapiiriä ja siinä tapahtuvia potentiaalin muutoksia. Maadoitetaan virtapiirin kohta A, jolloin sen potentiaali $V_A = 0$ V.



Jännitelähteen sisäinen resistanssi R_s ja myös ulkoinen vastus R_u aiheuttavat sähkövirran suunnassa tarkasteltuna potentiaalin alenemisen (jännitehäviön). Kuvaajasta nähdään, että lähdejännite on $E = U + R_s I$. **Kuormitetun** jännitelähteen napojen välinen jännite, **napajännite**, on $U = E - R_s I$.

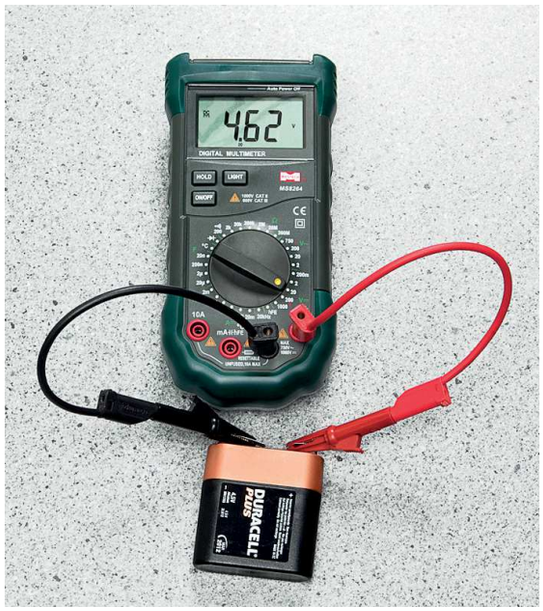
Jännitelähteen napajännite

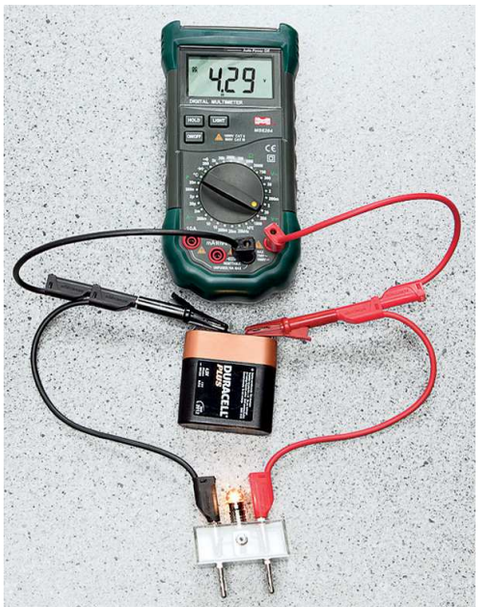
Kuormitetun jännitelähteen napajännite on

$$U = E - R_s I,$$

jossa U on napajännite, E lähdejännite ja $R_s I$ jännitelähteessä tapahtuva jännitehäviö.

Pariston lähdejännite on suurempi kuin sen napajännite.





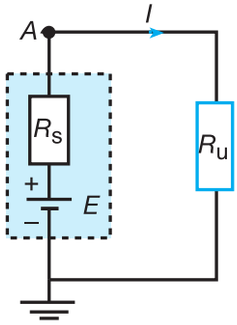
Kuormittamattoman jännitelähteen napajännite on yhtä suuri kuin lähdejännite. Kun paristoa kuormitetaan, pariston napojen välinen jännite pienenee hieman. Paristossa tapahtuu jännitehäviö, jonka suuruus riippuu paristosta saatavasta sähkövirrasta ja pariston sisäisestä resistanssista.

Jännitelähteen toiminnassa on olennaista se, miten sen napajännite riippuu kuormituksesta. Vanha paristo on usein huono jännitelähde, sillä kuormituksen aikana sen sisäinen resistanssi on suuri ja napajännite pieni. Uuden pariston napajännite on suuri, koska sen sisäinen resistanssi on pieni.

Esimerkki 11

Pariston lähdejännite on 4,5 V ja sisäinen resistanssi 3,2 Ω. Paristo kytketään vastukseen, jonka resistanssi on 15 Ω. Laske
a) piirissä kulkeva sähkövirta
b) kuormitetun pariston napajännite.

$E = 4{,}5\ \text{V}, \quad R_\text{s} = 3{,}2\ \Omega, \quad R_\text{u} = 15\ \Omega$



a) Kirchhoffin 2. lain mukaan umpinaisessa silmukassa potentiaalimuutosten summa on nolla: $\sum \Delta V = 0$ eli $E - R_\text{s}I - R_\text{u}I = 0$. Ratkaistaan yhtälöstä sähkövirta:

$$E = R_\text{s}I + R_\text{u}I \quad \text{eli} \quad E = (R_\text{s} + R_\text{u})I.$$

Piirissä kulkeva sähkövirta on

$$I = \frac{E}{R_\text{s} + R_\text{u}} = \frac{4{,}5\ \text{V}}{3{,}2\ \Omega + 15\ \Omega} = 0{,}247253\ \text{A} \approx 0{,}25\ \text{A}.$$

Sähkövirta on 0,25 A.

b) Pariston napajännite on

$$U = E - R_\text{s}I = 4{,}5\ \text{V} - 3{,}2\ \Omega \cdot 0{,}247253\ \text{A} \approx 3{,}7\ \text{V}.$$

Napajännite on 3,7 V.

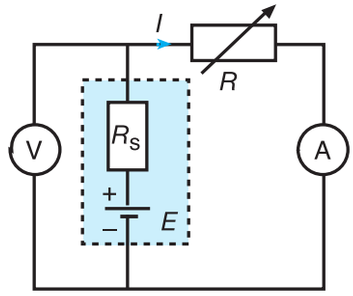
Esimerkki 12

Pienoisakun sisäinen resistanssi ja lähdejännite pyrittiin määrittämään mahdollisimman tarkasti mittaamalla akun napajännite useilla kuormitusvirran arvoilla. Mittaustulokset taulukoitiin.

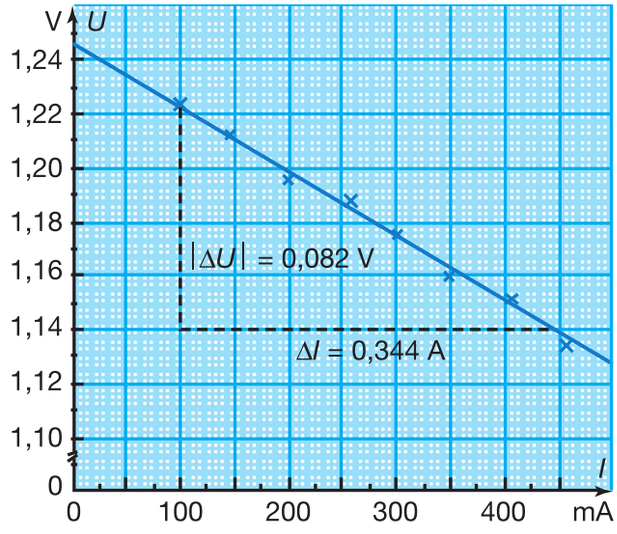
I/mA	100	148	200	260	301	348	408	460
U/V	1,222	1,212	1,195	1,186	1,174	1,160	1,150	1,133

a) Piirrä mittaukseen soveltuva kytkentäkaavio.
b) Määritä sopivaa graafista esitystä hyväksi käyttäen akun sisäinen resistanssi ja lähdejännite. [S2001, 15]

a) Mittaukseen soveltuva kytkentäkaavio:



b) Esitetään mittaustulokset (I, U)-koordinaatistossa.



Akun sisäinen resistanssi saadaan (I, U)-koordinaatistoon piirretyn suoran $U = E - R_s I$ fysikaalisen kulmakertoimen itseisarvona:

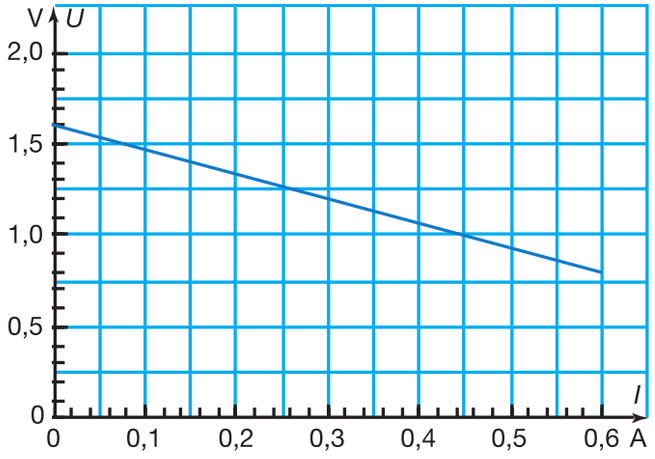
$$R_s = \left|\frac{\Delta U}{\Delta I}\right| = \frac{|1{,}140\ \text{V} - 1{,}222\ \text{V}|}{|0{,}444\ \text{A} - 0{,}100\ \text{A}|} = \frac{0{,}082\ \text{V}}{0{,}344\ \text{A}} \approx 0{,}24\ \Omega.$$

U-akselin leikkauskohdasta ekstrapoloimalla saatu lähdejännite on $E \approx 1{,}25$ V.

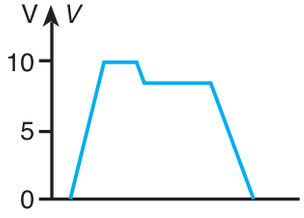
Sisäinen resistanssi on 0,24 Ω ja lähdejännite 1,25 V.

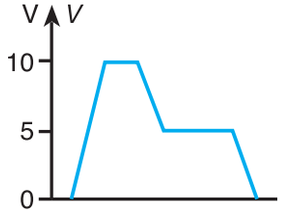
Tehtäviä

1-65. a) Paristoa kuormitettaessa mitattiin pariston napajännite ja piirissä kulkeva sähkövirta. Mittaustuloksista piirrettiin oheinen kuvaaja. Määritä kuvaajan perusteella pariston lähdejännite ja sisäinen resistanssi.
b) Miten pariston käyttöön vaikuttaa se, että pariston sisäinen resistanssi on suuri?



1-66. a) Sähköparin lähdejännite on 1,5 V. Sen navat yhdistetään 10,0 Ω:n vastuksella, jolloin piirissä kulkee 0,12 A:n virta. Laske sähköparin sisäinen resistanssi ja napajännite. Kuinka suuri on oikosulkuvirta?
b) Kuvat esittävät kahden johdinsilmukan potentiaalin muuttumista. Vaaka-akseli edustaa johdinta. Kummassa silmukassa on vanha paristo?





1-67. Auton akun lähdejännite on 12,0 V ja sisäinen resistanssi 12 mΩ. Käynnistysmoottori ottaa 110 A:n virran. Laske
a) akun napajännite
b) käynnistysmoottorin resistanssi.

1-68. Oppilastyössä tutkittiin pariston napajännitteen riippuvuutta paristosta otetusta virrasta. Esitä mittaukseen sopiva kytkentä. Eräässä kokeessa saatiin seuraavat tulokset:

I/mA	55	100	150	200	255	302	350	404	450	500
U/V	4,64	4,50	4,40	4,29	4,15	4,09	3,95	3,87	3,74	3,60

Määritä tulosten perusteella graafisesti pariston sisäinen resistanssi ja lähdejännite.

1-69. Pariston napoihin kytketään vastus, jonka resistanssi on 22 Ω. Pariston lähdejännite on 4,5 V ja sisäinen resistanssi 0,65 Ω. Piirrä piirin
a) kytkentäkaavio
b) potentiaalikäyrä.

1-70. Lukion fysiikan tunnilla tutkittiin pariston toimintaa kytkemällä napojen väliin erikokoisia vastuksia sekä mittaamalla virta ja napajännite. Tulokset olivat seuraavat:

U (V)	4,16	4,38	4,56
I (A)	0,413	0,221	0,111

a) Määritä ulkoisen resistanssin arvo kussakin tapauksessa.
b) Arvioi sopivan kuvaajan avulla tuloksista pariston lähdejännite ja sisäinen resistanssi.
c) Arvioi pariston antama suurin mahdollinen virta.
[Helsingin, Jyväskylän, Oulun ja Turun yliopisto 2001]

Paristojen sarja- ja rinnankytkentä

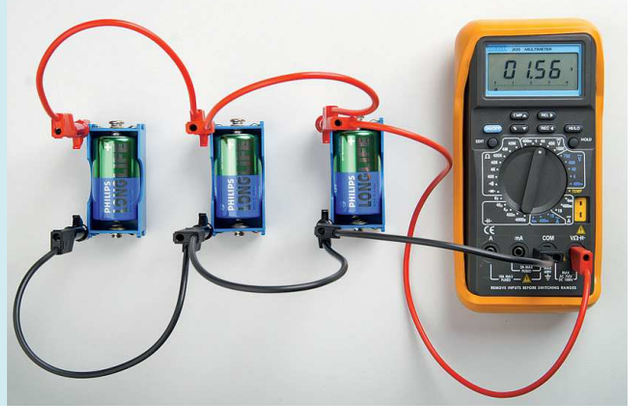
Jännitelähteitä, kuten sähköpareja tai paristoja, voidaan kytkeä yhteen eri tavoin. Kytketyt jännitelähteet toimivat kuten yksi jännitelähde. Tarkastellaan samanlaisten paristojen kytkemistä sarjaan ja rinnan. Paristot ovat sarjassa, kun ne on kytketty peräkkäin siten, että edellisen pariston positiivinen napa on yhdistetty seuraavan negatiiviseen napaan. Paristot ovat rinnan, jos niiden samanmerkkiset navat on yhdistetty keskenään.

Oppilastyö ▪ Paristojen kytkennät

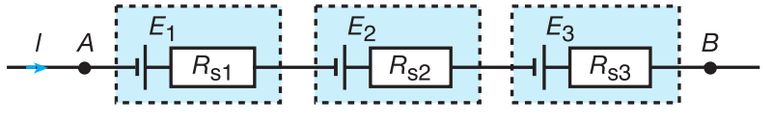
Mittaa erikseen kolmen samanlaisen pariston napajännite.

1. Kytke kaksi paristoa sarjaan. Mittaa yleismittarilla sarjaan kytkettyjen paristojen muodostaman yhdistelmän napajännite. Vertaa yhdistelmän jännitettä yksittäisen pariston jännitteeseen. Toista koe käyttäen kolmea paristoa.

2. Kytke kaksi paristoa rinnan. Toista rinnan kytketyllä yhdistelmällä kaikki kohdan 1 työvaiheet.



Oppilastyössä havaitaan, että sarjakytkennässä paristojen jännite kasvaa ja rinnankytkennässä jännite ei muutu.



Kolme sarjaan kytkettyä paristoa.

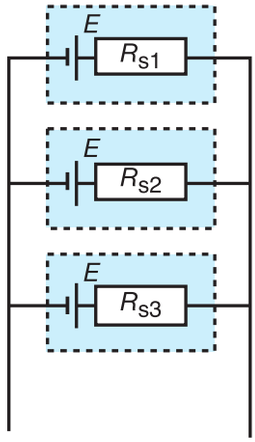
Kuva esittää kolmea sarjaan kytkettyä paristoa virtapiirin välillä AB. Sarjakytkennässä paristojen erimerkkiset navat on yhdistetty. Jos paristojen läpi kulkee sähkövirta I, jokaisessa paristossa tapahtuu jännitehäviö R_sI. Paristoyhdistelmän lähdejännite E on paristojen lähdejännitteiden summa, eli $E = E_1 + E_2 + E_3$. Yhdistelmän sisäinen resistanssi R_s on paristojen sisäisten resistanssien summa, eli $R_s = R_{s1} + R_{s2} + R_{s3}$.

Sarjakytkentä

Sarjakytkennässä paristojen erimerkkiset navat yhdistetään toisiinsa.

Sarjaan kytkettyjen paristojen

- lähdejännite on yksittäisten paristojen lähdejännitteiden summa, eli $E = E_1 + E_2 + \ldots + E_n$
- napajännite on yksittäisten paristojen napajännitteiden summa, eli $U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$
- sisäinen resistanssi on yksittäisten paristojen sisäisten resistanssien summa, eli $R_s = R_{s1} + R_{s2} + \ldots + R_{sn}$.



Kuva esittää kolmea samanlaista rinnan kytkettyä paristoa: niiden positiiviset navat on yhdistetty toisiinsa ja negatiiviset navat toisiinsa.

Kun kytketään samanlaisia paristoja rinnan, paristoyhdistelmän napojen välinen jännite on sama kuin yksittäisen pariston napajännite. Jokaisessa paristossa tapahtuu yhtä suuri jännitehäviö. Kun paristot on kytketty rinnan, myös niiden sisäiset resistanssit ovat rinnan kytketyt.

Vastusten rinnankytkennässä vastusyhdistelmän resistanssi on aina pienempi kuin yksittäiset resistanssit. Tämän takia paristojen rinnankytkennässä yhdistelmän sisäisestä resistanssista johtuva jännitehäviö on pienempi kuin yhdellä paristolla. Näin ollen rinnan kytkettyjen samanlaisten paristojen yhdistelmän napajännite on hieman suurempi kuin yhden pariston napajännite. Samoin paristojen yhdistelmästä saatava sähkövirta on hieman suurempi kuin yhdestä paristosta saatava sähkövirta. Yhdistelmän käyttöikä on myös pidempi.

Rinnankytkentä

Rinnankytkennässä paristojen positiiviset navat yhdistetään toisiinsa ja negatiiviset navat toisiinsa.

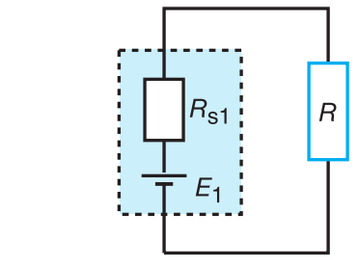
Rinnan kytkettyjen paristojen, joilla on yhtä suuri lähdejännite E ja sisäinen resistanssi R_s,

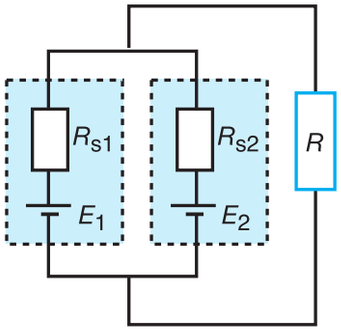
- lähdejännite on E
- sisäinen resistanssi R_s saadaan yhtälöstä

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_{s2}} + \ldots + \frac{1}{R_{sn}}.$$

Rinnan kytketyillä paristoilla on oltava sama lähdejännite E. Jos näin ei ole, paristojen välille syntyy sisäisiä sähkövirtoja, vaikka yhdistelmää ei kuormitettaisikaan. Paristo, jonka jännite on pienin, kuormittaa muita.

Esimerkki 13





a) Vastus kytketään sormiparistoon kuvan mukaisesti. Vastuksen resistanssi on $R = 15{,}0\ \Omega$. Sormipariston lähdejännite on 1,5 V ja sisäinen resistanssi 2,5 Ω. Laske tehonkulutus virtapiirissä olevassa vastuksessa.
b) Vastus kytketään kahteen rinnan kytkettyyn samanlaiseen sormiparistoon kuvan mukaisesti. Laske tehonkulutus virtapiirissä olevassa vastuksessa.
c) Vertaa vastuksen tehonkulutusta eri kytkennöissä.

$E_1 = E_2 = 1{,}5\ \text{V}, \quad R_{s1} = R_{s2} = 2{,}5\ \Omega, \quad R = 15{,}0\ \Omega$

a) Virtapiirissä kulkeva sähkövirta on

$$I = \frac{E}{R_{s1} + R} = \frac{1{,}5\ \text{V}}{2{,}5\ \Omega + 15\ \Omega} \approx 0{,}085714\ \text{A}.$$

Vastuksen tehonkulutus on $P = RI^2 = 15\ \Omega \cdot (0{,}085714\ \text{A})^2 \approx 0{,}11\ \text{W}$.

Tehonkulutus on 0,11 W.

b) Rinnankytkennässä paristoyhdistelmän lähdejännite on $E = 1{,}5$ V. Lasketaan yhdistelmän sisäinen resistanssi:

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_{s2}} \text{ eli } \frac{1}{R_s} = \frac{R_{s2}}{R_{s1}R_{s2}} + \frac{R_{s1}}{R_{s1}R_{s2}},$$

josta

$$R_s = \frac{R_{s1}R_{s2}}{R_{s1} + R_{s2}} = \frac{2{,}5\ \Omega \cdot 2{,}5\ \Omega}{2{,}5\ \Omega + 2{,}5\ \Omega} = 1{,}25\ \Omega.$$

Virtapiirissä kulkeva sähkövirta on

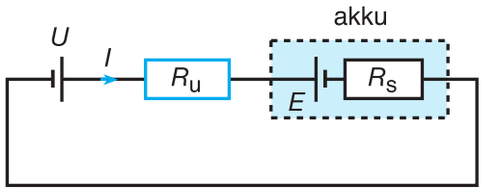
$$I = \frac{E}{R_s + R} = \frac{1{,}5\ \text{V}}{1{,}25\ \Omega + 15\ \Omega} \approx 0{,}092308\ \text{A}.$$

Vastuksen tehonkulutus on $P = RI^2 = 15\ \Omega \cdot (0{,}092308\ \text{A})^2 \approx 0{,}13\ \text{W}$.

Tehonkulutus on 0,13 W.

c) Kun kaksi samanlaista sormiparistoa kytketään rinnan, kytkennästä saatava sähkövirta on hieman suurempi kuin pelkästään yhdestä sormiparistosta saatu sähkövirta. Näin ollen myös tehonkulutus on hieman suurempi.

Esimerkki 14



Kuvan kytkennässä pienoisakku ladataan 13 V:n jännitteellä. Akun lähdejännite on 1,41 V ja sisäinen resistanssi 0,044 Ω. Ulkoisen vastuksen suuruus on $R_u = 11\ \Omega$.
a) Selitä, kuinka ladattava akku kytketään jännitelähteeseen.
b) Laske, kuinka suuri sähkövirta kulkee ladattaessa akun läpi.
c) Kuinka suuri akun napajännite on latauksen aikana?

$U = 13\ \text{V}, \quad E = 1{,}41\ \text{V}, \quad R_s = 0{,}044\ \Omega, \quad R_u = 11\ \Omega$

a) Kun akku ladataan, sen positiivinen napa kytketään laturin positiiviseen napaan ja negatiivinen napa laturin negatiiviseen napaan.

b) Kirchhoffin 2. lain mukaan suljetulla kierroksella potentiaalimuutosten summa on nolla eli $\sum \Delta V = U - R_u I - E - R_s I = 0$. Yhtälöstä $U - E = I(R_s + R_u)$ akun läpi kulkeva sähkövirta on

$$I = \frac{U - E}{R_s + R_u} = \frac{13\ \text{V} - 1{,}41\ \text{V}}{0{,}044\ \Omega + 11\ \Omega} = 1{,}04944\ \text{A} \approx 1{,}0\ \text{A}.$$

Sähkövirran suuruus on 1,0 A.

c) Akun napajännite latauksen aikana on

$$U_{\text{akku}} = E + R_s I = 1{,}41\ \text{V} + 0{,}044\ \Omega \cdot 1{,}04944\ \text{A} \approx 1{,}5\ \text{V}.$$

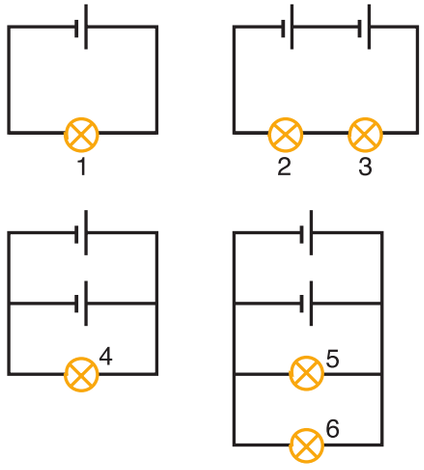
Napajännitteen suuruus on 1,5 V.

Esimerkiksi kodin viihdekeskuksen ohjaamisessa käytettävät kaukosäätimet tarvitsevat toimiakseen paristoja. Paristot on osattava kytkeä oikein. Usein koteloon on piirretty paristojen kuvat kytkennän helpottamiseksi.

Tehtäviä

1-71. Lamppu kytketään sähköpariin, jolla on pieni sisäinen resistanssi. Tämän jälkeen kolme samanlaista sähköparia kytketään
a) sarjaan ja tämä paristo kytketään äskeiseen lamppuun
b) rinnan ja tämä paristo kytketään lamppuun.
Kuvaile perustellen, miten lamppujen kirkkaus muuttuu.

1-72. Oheisessa kytkennässä kaikilla paristoilla on sama lähdejännite. Paristojen sisäistä resistanssia ei oteta huomioon. Myös lamput ovat samanlaiset ja niiden resistanssit ovat samat. Perustele lamppujen kirkkausjärjestys.

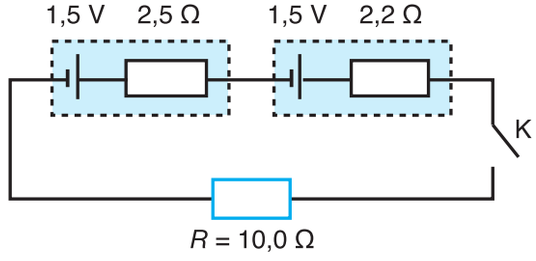


1-73. Kolme 1,5 V:n paristoa kytketään keskenään a) sarjaan b) rinnan.
Paristojen sisäiset resistanssit ovat 0,60 Ω, 1,0 Ω ja 1,4 Ω. Laske kummankin paristoyhdistelmän lähdejännite ja sisäinen resistanssi.

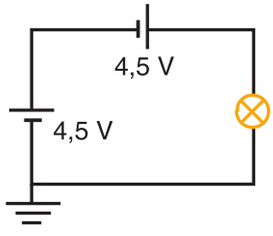
1-74. Neljä paristoa, joista kunkin lähdejännite on 1,5 V ja sisäinen resistanssi 0,10 Ω, kytketään a) sarjaan b) rinnan
ja yhdistetään ulkoiseen vastukseen, jonka resistanssi on 2,6 Ω. Laske piirissä kulkeva sähkövirta molemmissa tapauksissa.

1-75. Auton 12 V:n akku on tyhjentynyt. Auto yritetään käynnistää käyttämällä toisen auton 12 V:n akkua, mutta erehdyksessä akkujen erimerkkiset navat kytketään toisiinsa. Kummankin akun sisäinen resistanssi on 0,052 Ω.
a) Laske akkujen kytkennässä kulkeva sähkövirta.
b) Mitä vaaroja kytkentä aiheuttaa?

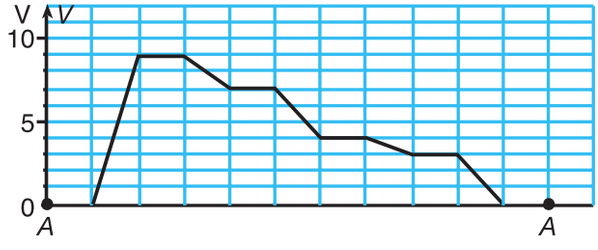
1-76. a) Laske kytkennän paristoissa kulkevat sähkövirrat, kun kytkin suljetaan.
b) Laske, mitkä ovat paristojen napajännitteet, kun kytkin suljetaan.



1-77. Esitä suljetun virtapiirin potentiaali graafisesti. Jännitelähteiden sisäiset resistanssit ovat pieniä.



1-78. Virtapiirissä on yksi silmukka, ja siinä on kaksi paristoa ja vastuksia. Toisen pariston lähdejännite on 9,0 V ja toisen 3,0 V. Kuva esittää kyseisen virtapiirin potentiaalia silmukan eri osissa. Kohta *A* on maadoitettu. Pariston sisäistä resistanssia ei oteta huomioon. Piirrä kytkentäkaavio virtapiiristä.

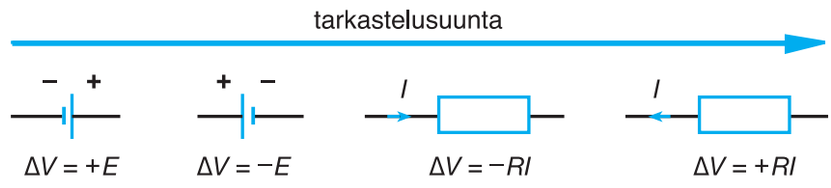


1.7 Tasavirtapiirien laskennallinen hallinta

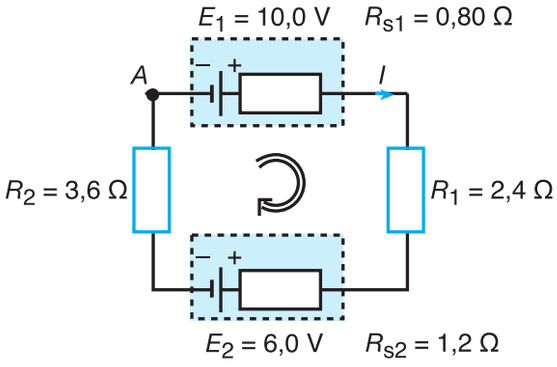
Tasavirtapiireissä tarkastellaan usein sähkövirtojen suuruuksia ja suuntia, piirin potentiaaleja, jännitteitä, resistansseja sekä energian- ja tehonkulutusta.

Ohmin laki
Vakiolämpötilassa komponentissa tapahtuva jännitehäviö on $U = RI$, jossa R on komponentin, kuten vastuksen, resistanssi ja I sen läpi kulkeva sähkövirta.
Kirchhoffin 1. laki
Virtapiirissä haarautumispisteeseen tulevien sähkövirtojen summa on yhtä suuri kuin siitä lähtevien sähkövirtojen summa.
Kirchhoffin 2. laki
Suljetussa virtapiirissä potentiaalimuutosten summa on nolla eli $\sum \Delta V = 0$.
Joulen laki
Vastus (tai laite), jonka resistanssi on R ja jonka läpi kulkee sähkövirta I, kuluttaa virtapiirissä energiaa teholla $P = RI^2$.

Virtapiirilaskujen suoritusvaiheet
1. Ellei kytkentäkaavioon ole merkitty sähkövirtojen suuntia, valitse ne. Huomaat valinneesi suunnan väärin, jos laskutuloksessa virran arvo on negatiivinen.
2. Valitse virtapiirin tarkastelusuunta joko myötä- tai vastapäivään jokaiselle silmukalle erikseen.
3. Jos virtapiirissä on johtimien haarautumiskohtia, muodosta Kirchhoffin 1. lain mukaisesti virtayhtälöt.
4. Valitse suljetussa virtapiirissä lähtöpiste. Usein on helpointa kiertää virtapiiri virran oletetussa suunnassa. Potentiaalitarkastelun lähtöpisteeksi voit valita myös kohdan, jonka potentiaali on nolla.
5. Sovella Kirchhoffin 2. lakia niin moneen suljettuun virtapiiriin, että saat tarpeeksi monta yhtälöä tuntemattomien suureiden laskemiseksi. Potentiaalien muutoksien etumerkit valitaan seuraavalla tavalla:



Esimerkki 15



Laske
a) virtapiirissä kulkeva sähkövirta
b) jännitelähteiden napajännitteet.

$E_1 = 10{,}0\ \text{V}, \quad R_{s1} = 0{,}80\ \Omega, \quad E_2 = 6{,}0\ \text{V}, \quad R_{s2} = 1{,}2\ \Omega,$
$R_1 = 2{,}4\ \Omega, \quad R_2 = 3{,}6\ \Omega$

a) Oletetaan, että sähkövirran suunta on myötäpäivään piirroksen mukaisesti. Kierretään virtapiiri myötäpäivään lähtien pisteestä A. Kirchhoffin 2. lain mukaan $\sum \Delta V = 0$ eli

$$E_1 - R_{s1}I - R_1 I - E_2 - R_{s2}I - R_2 I = 0.$$

Ratkaistaan yhtälöstä sähkövirta:

$$E_1 - E_2 = I(R_{s1} + R_1 + R_{s2} + R_2)$$

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_{s1} + R_1 + R_{s2} + R_2}$$

$$= \frac{10{,}0\ \text{V} - 6{,}0\ \text{V}}{0{,}80\ \Omega + 2{,}4\ \Omega + 1{,}2\ \Omega + 3{,}6\ \Omega} = 0{,}50\ \text{A}.$$

Sähkövirta on 0,50 A.

b) Jännitelähteen napajännite saadaan jännitelähteessä tapahtuvana potentiaalin muutoksena tarkastelusuunnassa:

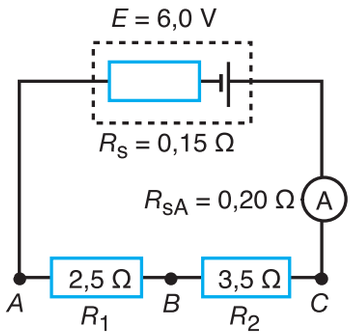
$$U_1 = E_1 - R_{s1}I = 10{,}0\ \text{V} - 0{,}80\ \Omega \cdot 0{,}50\ \text{A} = 9{,}6\ \text{V}$$

$$U_2 = -R_{s2}I - E_2 = -1{,}2\ \Omega \cdot 0{,}50\ \text{A} - 6{,}0\ \text{V} = -6{,}6\ \text{V}.$$

Jännitelähteiden napajännitteet ovat 9,6 V ja −6,6 V.

Napajännite U_2 on negatiivinen, koska kyseinen jännitelähde on kytketty tarkastelusuunnassa vastakkaiseen suuntaan kuin ylempi jännitelähde. Napajännitteeltään negatiivinen **jännitelähde latautuu**: jännitelähde U_1 lataa lähdettä U_2.

Esimerkki 16



Kuvan kytkennässä ampeerimittarin resistanssi on 0,20 Ω.
a) Mitä ampeerimittari näyttää?
b) Mitä mittari näyttää, kun maadoitetaan
1) piste A 2) pisteet A ja B?
c) Mikä on pisteen C potentiaali, kun piste A on maadoitettu?

$E = 6{,}0\ \text{V}, \quad R_s = 0{,}15\ \Omega, \quad R_{sA} = 0{,}20\ \Omega, \quad R_1 = 2{,}5\ \Omega, \quad R_2 = 3{,}5\ \Omega$

a) Sähkövirran suunta virtapiirissä on myötäpäivään. Kierretään virtapiiri myötäpäivään lähtien pisteestä A. Kirchhoffin 2. lain mukaan on $\sum \Delta V = 0$ eli

$$E - R_s I - R_{sA} I - R_2 I - R_1 I = 0.$$

Ratkaistaan yhtälöstä $E = I(R_s + R_{sA} + R_2 + R_1)$ sähkövirta:

$$I = \frac{E}{R_s + R_{sA} + R_2 + R_1} = \frac{6{,}0\ \text{V}}{0{,}15\ \Omega + 0{,}20\ \Omega + 3{,}5\ \Omega + 2{,}5\ \Omega}$$
$$= 0{,}944882 \approx 0{,}94\ \text{A}.$$

Ampeerimittarin lukema on 0,94 A.

b) Pisteen A maadoittaminen ei vaikuta piirin sähkövirtaan.

Ampeerimittarin lukema on 0,94 A.

Kun lisäksi piste B maadoitetaan, sähkövirta kulkee maan kautta vastuksen R_1 ohi. Sähkövirta on

$$I = \frac{E}{R_s + R_{sA} + R_2} = \frac{6{,}0\ \text{V}}{0{,}15\ \Omega + 0{,}20\ \Omega + 3{,}5\ \Omega} \approx 1{,}6\ \text{A}.$$

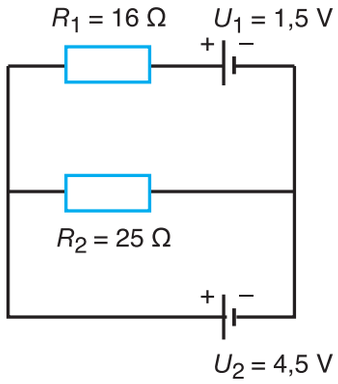
Ampeerimittarin lukema on 1,6 A.

c) Pisteen C potentiaali on

$$V_C = E - R_s I - R_{sA} I$$
$$= 6{,}0\ \text{V} - 0{,}15\ \Omega \cdot 0{,}944882\ \text{A} - 0{,}20\ \Omega \cdot 0{,}944882\ \text{A}$$
$$\approx 5{,}7\ \text{V}.$$

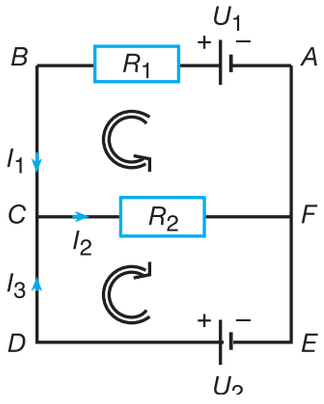
Pisteen C potentiaali on 5,7 V.

Esimerkki 17



Laske kuvan virtapiirin
a) eri haaroissa kulkevat sähkövirrat
b) jännitehäviö ja tehonkulutus vastuksessa R_1.
Jännitelähteiden sisäiset resistanssit oletetaan pieniksi.

$U_1 = 1{,}5$ V, $\quad U_2 = 4{,}5$ V, $\quad R_1 = 16\ \Omega$, $\quad R_2 = 25\ \Omega$



a) Merkitään kytkentäkaavioon sähkövirtojen oletetut suunnat viereisen kuvan mukaisesti. Kirchhoffin 1. lain mukaan pisteessä C on voimassa $I_1 + I_3 = I_2$. Kierretään silmukat $ABCF$ ja $EDCF$ kuvan mukaisesti. Kirchhoffin 2. lain $\sum \Delta V = 0$ mukaan saadaan yhtälöt

$$U_1 - R_1 I_1 - R_2 I_2 = 0 \text{ ja}$$
$$U_2 - R_2 I_2 = 0.$$

Edellisestä yhtälöstä saadaan sähkövirta I_2:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{4{,}5\ \text{V}}{25\ \Omega} \approx 0{,}18\ \text{A}.$$

Yhtälö $U_1 - R_1 I_1 - R_2 I_2 = 0$ saadaan muotoon $U_1 - R_2 I_2 = R_1 I_1$, josta sähkövirta I_1 on

$$I_1 = \frac{U_1 - R_2 I_2}{R_1} = \frac{1{,}5\ \text{V} - 25\ \Omega \cdot 0{,}18\ \text{A}}{16\ \Omega}$$
$$= -0{,}1875\ \text{A} \approx -0{,}19\ \text{A}.$$

Sähkövirran I_1 suunta on vastakkainen oletettuun suuntaan nähden.

Yhtälöstä $I_1 + I_3 = I_2$ saadaan sähkövirraksi I_3:

$$I_3 = I_2 - I_1 = 0{,}18\ \text{A} - (-0{,}1875\ \text{A}) \approx 0{,}37\ \text{A}.$$

Virtapiirissä kulkevat sähkövirrat ovat 0,19 A, 0,18 A ja 0,37 A.

b) Resistanssi R_1 aiheuttaa jännitehäviön

$$U_{R_1} = R_1 I_1 = 16\ \Omega \cdot 0{,}1875\ \text{A} \approx 3{,}0\ \text{V}.$$

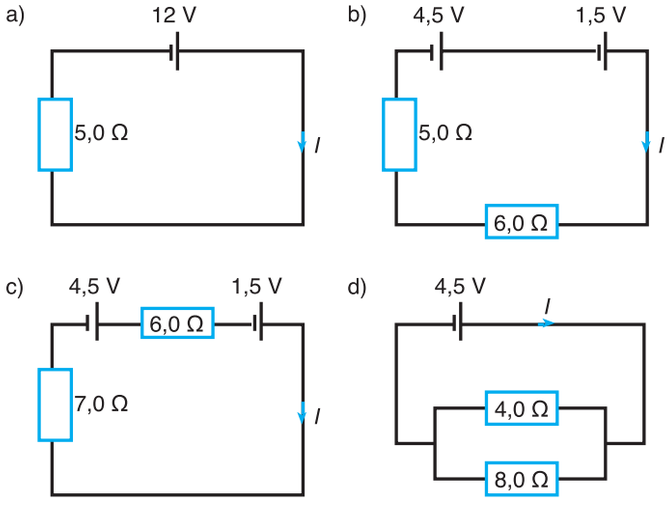
Tehonkulutus vastuksessa R_1 on

$$P_{R_1} = R_1 I_1^2 = 16\ \Omega \cdot (0{,}1875\ \text{A})^2 \approx 0{,}56\ \text{W}.$$

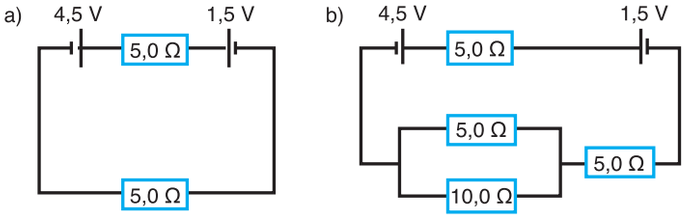
Jännitehäviö on 3,0 V ja tehonkulutus 0,56 W.

Tehtäviä

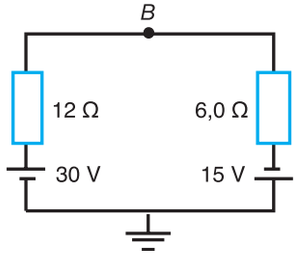
1-79. Laske sähkövirrat seuraavissa virtapiireissä.



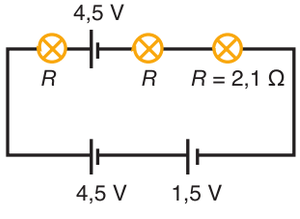
1-80. Laske paristojen läpi kulkevat sähkövirrat.



1-81. Laske kuvan virtapiirissä kulkeva sähkövirta ja pisteen B potentiaali. Jännitelähteiden sisäiset resistanssit ovat pieniä.

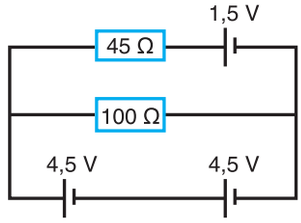


1-82. Lamput ovat samanlaisia, ja paristojen sisäiset resistanssit ovat pieniä. Laske piirin sähkövirta.

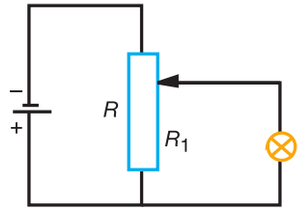


1-83. Kahta lamppua, joiden resistanssit ovat 150 Ω ja 250 Ω, saa kuormittaa korkeintaan 80 W:n teholla. Mikä on suurin jännite, johon nämä lamput voi kytkeä sarjaan?

1-84. Laske sähkövirrat virtapiirin eri haaroissa ja jännitehäviö 45 Ω:n vastuksessa.



1-85. Lamppu kytketään säätövastuksen välityksellä 12 V:n akkuun oheisen kytkentäkaavion mukaisesti. Säätövastuksen kokonaisresistanssi R on 32 Ω. Kun säätövastuksen liukukytkin on asetettu siten, että R_1 on 28 Ω (kuva), lampun napojen välinen jännite on 4,5 V. Kuinka monta prosenttia akusta otetusta tehosta kuluu tällöin lampussa? Akun sisäinen resistanssi on hyvin pieni. [K2006, 7]



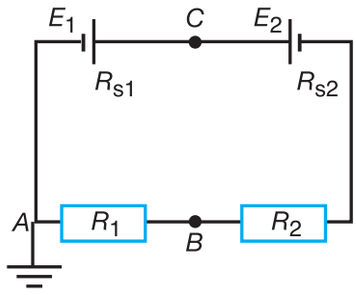
1-86. Kännykän akkua jouduttiin lataamaan moottoripyörän akulla, jolloin lähdejännite oli 6,15 V ja sisäinen resistanssi 0,25 Ω. Kännykän akun lähdejännite oli 5,24 V ja sisäinen resistanssi 0,51 Ω. Latausvirran rajoittamiseksi akkujen kanssa sarjaan kytkettiin vastus, jonka resistanssi oli 2,00 Ω. Virta mitattiin ampeerimittarilla, jonka resistanssi oli hyvin pieni.

a) Piirrä kytkentäkaavio.

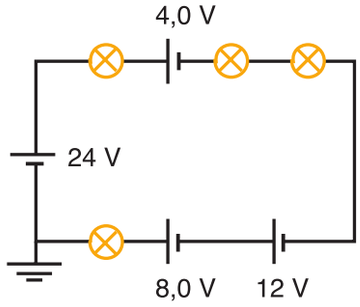
b) Kuinka suurta virtaa ampeerimittari näytti?

c) Kuinka suurella teholla sähköenergiaa siirtyi tällöin kännykän akkuun? [K1999, 7]

1-87. Kuvan kytkennässä sähkölaitteiden lähdejännitteet ovat $E_1 = 14{,}6$ V ja $E_2 = 6{,}2$ V sekä sisäiset resistanssit $R_{s1} = 0{,}20\ \Omega$ ja $R_{s2} = 0{,}30\ \Omega$. Vastusten resistanssit ovat $R_1 = 1{,}8\ \Omega$ ja $R_2 = 3{,}3\ \Omega$. Määritä pisteiden *A*, *B* ja *C* potentiaalit.



1-88. Esitä suljetun virtapiirin potentiaali graafisesti. Jokaisessa lampussa tapahtuu 10 V:n jännitehäviö. Jännitelähteiden sisäiset resistanssit ovat pieniä.

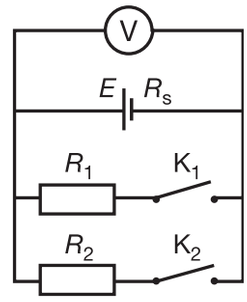


1-89. Oheisen kaavion mukaisessa kytkennässä pariston lähdejännite on 4,58 V ja sisäinen resistanssi 0,95 Ω. Vastusten resistanssit ovat $R_1 = 12{,}0\ \Omega$ ja $R_2 = 20{,}0\ \Omega$, ja volttimittarin resistanssi on hyvin suuri. Mikä on mittarin lukema, kun

a) kytkimet K_1 ja K_2 ovat auki

b) kytkin K_1 on kiinni ja K_2 auki

c) molemmat kytkimet ovat kiinni? [K2008, 7]



1-90. Matkapuhelimen akussa on merkinnät 670 mAh ja 3,6 V ja laturissa merkintä 1,3 W. Kun akusta otettiin vastuksen kautta 53,5 mA:n virta, niin akun napajännite oli 3,66 V. Kun virta oli 126 mA, niin napajännite oli 3,61 V. Laske akun sisäinen resistanssi ja lähdejännite. [TKK 2002 (osa)]

Testaa, osaatko

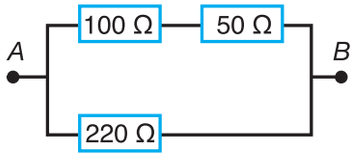
Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?
a) On havaittu, että sähkövirralla on magneettisia vaikutuksia.
b) Sähkövirran kulku on mahdollista vain suljetussa virtapiirissä.
c) Sähkövirran suunta johteessa on sama kuin elektronien kulkusuunta.

2. Sulake
a) pienentää sähkövirran laitteille sopivaksi
b) suojaa sähkölaitteita liian suurilta virroilta
c) katkaisee virtapiirin, kun sen sisällä oleva lanka sulaa poikki liian suuren sähkövirran vaikutuksesta.

3. Ampeerimittari
a) kytketään tutkittavan laitteen kanssa rinnan
b) kytketään tutkittavan laitteen kanssa sarjaan
c) on valmistettava siten, että sen sisäinen resistanssi on suuri.

4. Kuvan kytkennässä kokonaisresistanssi on
a) 370 Ω b) 250 Ω c) 90 Ω.



5. Edellisessä kytkennässä pisteiden *A* ja *B* välinen jännite on 4,5 V. Silloin 50 Ω:n vastuksen läpi kulkevan sähkövirran suuruus on
a) 20 mA b) 30 mA c) 50 mA.

6. Metallilangan resistanssi
a) on suoraan verrannollinen langan pituuteen
b) pienenee, kun lankaa ohennetaan
c) riippuu lämpötilasta.

7. Ohmin lain mukaan metallijohtimessa tapahtuva jännitehäviö on
a) aina suoraan verrannollinen
b) aina kääntäen verrannollinen
c) vakiolämpötilassa suoraan verrannollinen johtimen läpi kulkevaan sähkövirtaan.

8. Mikä seuraavista on Kirchhoffin 2. laki?
a) Komponentin tehonkulutus virtapiirissä on $P = RI^2$.
b) Virtapiirin pisteeseen tulevien virtojen summa on yhtä suuri kuin pisteestä lähtevien virtojen summa.
c) Suljetussa virtapiirissä potentiaalimuutosten summa on nolla eli $\sum \Delta V = 0$.

9. Mitä seuraavista käytetään energian yksikön tunnuksena?
a) 1 J b) 1 kWh c) 1 MWh

10. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?
a) Kun paristoa kuormitetaan, sen napajännite on aina suurempi kuin lähdejännite.
b) Kun paristo ikääntyy (kuluu), sen sisäinen resistanssi kasvaa.
c) Sähköparin lähdejännite riippuu siinä tapahtuvista kemiallisista reaktioista.

Tiivistelmä

- Sähkövirran suunta jännitelähteen ulkopuolella on plusnavasta miinusnapaan.
- Kirchhoffin lait:
  1. Virtapiirissä haarautumispisteeseen tulevien sähkövirtojen summa on yhtä suuri kuin siitä lähtevien sähkövirtojen summa.
  2. Suljetussa virtapiirissä potentiaalimuutosten summa on nolla eli $\sum \Delta V = 0$.
- Ohmin laki: Metallijohtimessa jännitehäviö on vakiolämpötilassa verrannollinen sähkövirtaan I eli $U = RI$, jossa R on johtimen resistanssi.
- Resistanssi R ilmaisee vastuksen, kuten vastuslangan, kyvyn vastustaa sähkövirran kulkua. Resistanssi on vastuksessa tapahtuvan jännitehäviön ja vastuksen läpi kulkevan sähkövirran suhde: $R = \frac{U}{I}$.
  Resistanssi: $R = \rho \frac{l}{A}$, jossa ρ on johdinaineen resistiivisyys, l johtimen pituus ja A johtimen poikkipinta-ala.
- Piirin potentiaali ilmaisee virtapiirin pisteiden väliset jännitteet, kun piirin yksi piste on maadoitettu. Piirin potentiaalia kuvataan potentiaalikäyrällä.
- Vastusten sarjakytkentä: $R = \sum R_i$.
  Vastusten rinnankytkentä: $\frac{I}{R} = \sum \frac{I}{R_i}$.
- Laitteen sähköteho: $P = UI$, jossa U on jännitehäviö ja I laitteen sähkövirta.
  Joulen laki: Vastus (tai laite), jonka resistanssi on R ja jonka läpi kulkee sähkövirta I, kuluttaa virtapiirissä energiaa teholla $P = RI^2$.
  Sähkön avulla siirretty energia: $E = Pt = UIt$, jossa P on laitteen sähköteho ja t käyttöaika.
- Kuormitetun jännitelähteen napajännite: $U = R - R_s I$.
- Sarjaan kytkettyjen parien napajännite on yksittäisten parien napajännitteiden summa. Rinnan kytkettyjen parien, joilla on yhtä suuri lähdejännite E ja sisäinen resistanssi R_s, lähdejännite on E.

2 Sähköstatiikka

Tässä luvussa opit

- sähköisen vuorovaikutuksen
- Coulombin lain
- sähkökentän
- varatun hiukkasen liikkeen sähkökentässä
- työperiaatteen sähkökentässä.

Keskeisiä käsitteitä ovat

- sähkövaraus ja sähköinen voima
- sähkökentän voimakkuus
- pistevarauksen sähkökenttä ja homogeeninen sähkökenttä
- potentiaali ja jännite
- sähköinen influenssi.

Miksi suurjännite-muuntajissa käytetään keraamisia eristeitä?

EKG-käyrää piirtävä laite on erikoisvalmisteinen oskilloskooppi, jossa sydänlihaksen sähköinen potentiaali näkyy ruudulla ajan funktiona.

Salamointia pilvissä sekä pilvien ja maanpinnan välillä.

Sähköä ympärillämme

Sähkövarauksien ympärillä on sähkökenttä, jonka välityksellä varaukset ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Vuorovaikutus ilmenee varauksisten hiukkasten ja varattujen kappaleiden välisinä voimavaikutuksina. Tästä aiheutuvat esimerkiksi sähköpurkaukset eristeissä ja sähkövirta kaikissa sähköä johtavissa aineissa.

Sähkövaraukset ja niiden ympärillä oleva sähkökenttä voivat aiheuttaa erilaisia aistein havaittavia ilmiöitä. Puhtaita, kuivia hiuksia kammatessasi tunnet voimavaikutuksen, kun hiukset tarttuvat kampaan. Saatat myös kuulla ritinää. Kammattaessa hiukset ja kampa tulevat sähköisiksi eli niihin on muodostunut vastakkaiset sähkövaraukset. Samoin vaatteet voivat ritistä sähköpurkauksien takia, kun kaksi erilaista vaatetta hankaa toisiinsa. Pimeässä tällaiset äkilliset sähkönpurkaukset voivat näkyä kipinöintinä.

Pilvien jää- ja lumikiteiden hankautuminen toisiaan vasten voi kerätä pilviin suuren sähkövarauksen. Tällöin pilviin sekä maan ja pilvien välille syntyy voimakkaita sähkökenttiä. Pilvien ja maanpinnan välissä on paksu ilmakerros, joka on eriste. Kun maan ja pilvien välinen jännite kohoaa kymmenien miljoonien volttien suuruiseksi, ilma ei enää pysty estämään varauksia purkautumasta. Sähköpurkauksen seuraukset näkyvät valona salaman välähtäessä ja kuuluvat äänenä ukkosen jyrähtäessä.

Hiukkaskiihdyttimissä varauksisia hiukkasia kiihdytetään hyvin korkeiden jännitteiden avulla. Aineen rakenteesta saadaan tietoa, kun kiihdytetyt hiukkaset törmäävät toisiinsa tai muuhun aineeseen. Röntgenputki on hiukkaskiihdytin, jonka tuottamista röntgenkuvista saadaan tietoa aineen sisältä rikkomatta ainetta. Potilaille tehtävät röntgenkuvaukset ovat jokapäiväisiä toimenpiteitä sairaaloissa, terveyskeskuksissa ja hammaslääkäreiden vastaanotoilla.

Hameen ja sukkahousujen välinen hankaus aiheuttaa elektronien siirtymistä ja vaatekappaleiden varautumisen.

Muovisessa liukumäessä hankauksesta johtuva jännite voi olla tuhansia tai jopa kymmeniätuhansia volttejа.

2.1 Sähkövaraus

Oppilastyö ▪ Sähköinen vuorovaikutus

1. Ota ilmapallo ja pakastemuovipussi ja kosketa niillä toisiaan. Hankaa muovipussilla ilmapalloa. Vie pussi ja ilmapallo ensin kauas toisistaan ja tuo ne sitten lähelle toisiaan. Tarkkaile pallon ja pussin välistä vuorovaikutusta.

2. Ota kaksi ilmapalloa ja kosketa niillä toisiaan. Hankaa kumpaakin ilmapalloa muovipussilla. Vie ilmapallot ensin kauas toisistaan ja tuo ne sitten lähelle toisiaan. Tarkkaile pallojen välistä vuorovaikutusta.

3. Ota eboniittisauva ja hankaa se turkiksella sähköiseksi. Aseta sauva telineeseen, jossa se voi pyöriä herkästi. Hankaa lasisauva sähköiseksi muovipussilla. Vie lasisauvan pää lähelle eboniittisauvan päätä. Mitä havaitset?

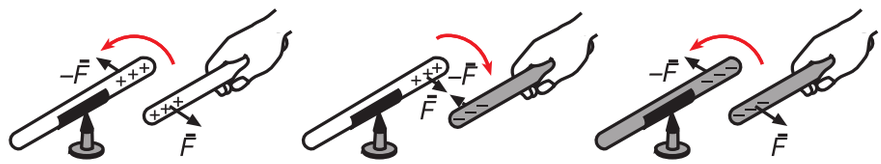
4. Ota toinen eboniittisauva ja hankaa sekin turkiksella sähköiseksi. Vie tämän eboniittisauvan pää lähelle telineessä olevan samanlaisen varatun sauvan päätä. Mitä havaitset?

Oppilastyössä havaitaan, että alussa kappaleiden välillä ei ole sähköistä vuorovaikutusta. Kun ilmapalloa hangataan pussilla, pallo ja pussi vetävät toisiaan puoleensa.

Samoin käy lasisauvalle ja eboniittisauvalle. Kappaleiden välille on syntynyt **sähköinen vuorovaikutus**, joka ilmenee kappaleiden välisenä vetävänä voimana. Oppilastyössä huomataan myös, että sähköinen vuorovaikutus on etävuorovaikutus: vuorovaikutus vaikuttaa kappaleiden välillä, vaikka kappaleet eivät kosketa toisiaan.

Vastaavasti oppilastyön kohdissa 2 ja 4 huomataan, että kappaleiden välille on syntynyt sähköinen vuorovaikutus, joka ilmenee kappaleiden välisenä hylkivänä voimana.

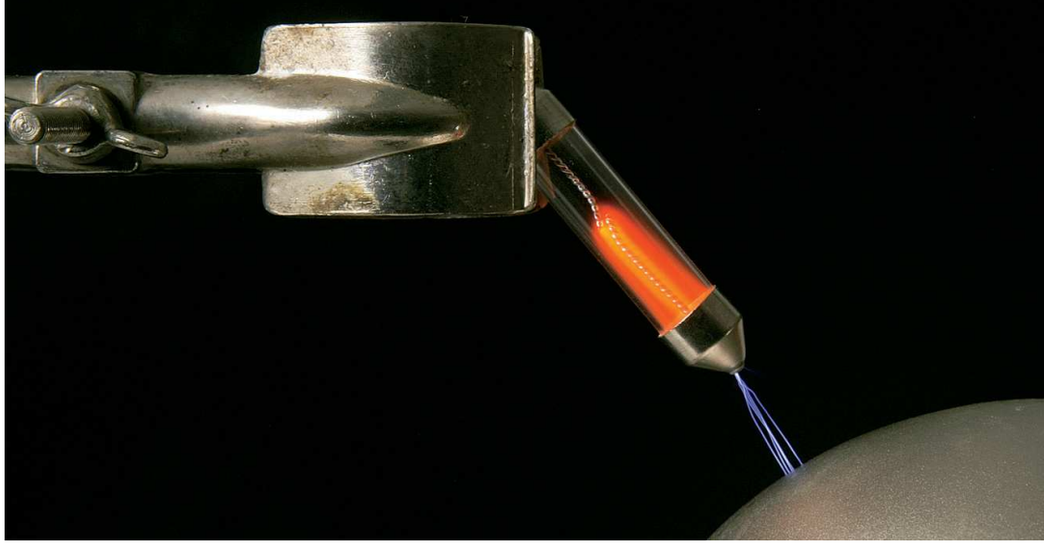
Oppilastyöstä voidaan päätellä, että **sähkövarausta on kahta lajia**. Samalla tavalla varatuilla kappaleilla on sama varaus, ja ne hylkivät toisiaan. Vastaavasti hankauksessa käytetyillä erilaisilla kappaleilla on erilaiset sähkövaraukset, ja ne vetävät toisiaan puoleensa. On olemassa **positiivista ja negatiivista sähkövarausta**.



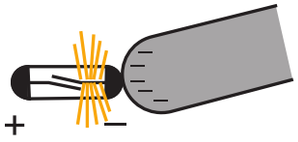
Sähkövaraus aiheuttaa sähköisen vuorovaikutuksen, joka havaitaan kappaleeseen kohdistuvana vetona, työntönä tai vääntönä.

Sähköinen vuorovaikutus on varauksisten hiukkasten, kuten elektronien ja protonien, välinen vuorovaikutus, joka voidaan havaita makromaailmassa kappaleisiin kohdistuvina voimina. Sähköisen vuorovaikutuksen aiheuttamaa veto- tai hylkimisvoimaa kutsutaan sähköiseksi voimaksi.

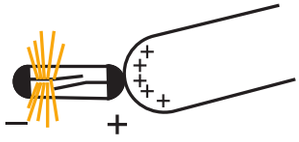
Sähkövaraus
Sähkövaraus on sähköisesti vuorovaikuttavien hiukkasten ominaisuus.
On olemassa positiivista ja negatiivista sähkövarausta.
Samanmerkkiset varaukset hylkivät toisiaan, ja erimerkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa.



Minkä merkkinen on metallipallon varaus?



Hohtolamppu ja eboniittisauva.



Hohtolamppu ja lasisauva.

Hohtolamppu ilmaisee kappaleen sähkövarauksen merkin. Kappaleesta irronneiden elektronien törmäykset lampun sisällä olevien kaasun rakenneosasten kanssa synnyttävät valoa. Se hohtolampun kohtio, josta elektronit irtoavat, hohtaa valoa. Jos hohtolampulla kosketaan sähköisesti varattua eboniittisauvaa, valo välähtää lampun sauvan puoleisessa päässä. Eboniittisauva siis hylkii varaukseltaan negatiivisia elektroneja, joten se on negatiivisesti varattu. Jos hohtolampulla kosketaan sähköisesti varattua lasisauvaa, elektronit irtoavat lampun vastakkaisesta päästä, jossa näkyy valon välähdys. Elektronit siirtyvät sieltä kohti sauvaa. Lasisauva vetää elektroneja puoleensa ja on siis positiivisesti varattu.

Mikroskooppiselta kannalta sähkövaraus on **hiukkasiin liittyvä** ominaisuus. Atomit koostuvat ytimestä, jolla on positiivinen sähkövaraus, sekä ytimen ympärillä olevista elektroneista, joilla on negatiivinen sähkövaraus. **Makroskooppiselta** kannalta sähkövaraus on myös **kappaleen ominaisuus**. Kun kappaleita hangataan toisiaan vasten, osa toisen kappaleen pinnalla olevista elektroneista irtoaa ja siirtyy toiseen kappaleeseen, joka ottaa ne vastaan. Tällöin toisella kappaleella on ylimäärä elektroneja, joten sen varaus on negatiivinen. Toisen kappaleen varaus on positiivinen, koska sillä on enemmän protoneja kuin elektroneja. Kappaleiden varautuminen hankauksessa riippuu siitä, miten niiden pinnalla aine voi luovuttaa tai vastaanottaa elektroneja: kappaleen varautuminen voidaan siis selittää siirtyvien elektronien avulla.

Hiukkanen	Varaus
elektroni	$-e$
protoni	$+e$
neutroni	0

Protonin sähkövaraus on $+e$ ja elektronin $-e$. Varausta e sanotaan **alkeisvaraukseksi**, joka on sähköopin tarkasteluissa pienin sähkövaraus. Alkeisvaraus on **luonnonvakio**, ja sen arvo on $e = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}$ C. Sähkövarauksen yksikkö SI-järjestelmässä on 1 C (coulombi), eli $[Q] = 1$ C.

Koska atomissa on yhtä monta protonia ja elektronia, atomin kokonaisvaraus on nolla. Jos atomi luovuttaa esimerkiksi yhden elektronin, atomista tulee **ioni**, jonka varaus on $+e$. Jos atomi ottaa vastaan yhden ylimääräisen elektronin, syntyneen ionin varaus on $-e$.

Kappaleen sähkövaraus
Kappaleen sähkövaraus Q on aina alkeisvarauksen e monikerta eli

$$Q = \pm ne, \text{ jossa } n = 0, 1, 2, \ldots$$

Aineessa on sekä positiivisesti että negatiivisesti varautuneita hiukkasia. Ulospäin varauksettomassa kappaleessa näitä hiukkasia on yhtä paljon. Tällöin varaukset kumoavat toisensa.

Sähkövarausten olemassaolo ja määrä voidaan todeta elektroskoopin avulla. Kun elektroskooppiin tuodaan sähkövaraus, samanmerkkisesti varautuvat metallilehdet – tai metallilehti ja runko – hylkivät toisiaan. Mitä suurempi varaus on, sitä suurempaan kulmaan metallilehti kääntyy.

Sähkövaraus voi ryhmittyä eristetyssä systeemissä eri tavoin, mutta varauksen kokonaismäärä ei muutu. Kun lasisauvaa hangataan muovipussilla, elektroneja siirtyy lasisauvasta muovipussiin. Lasisauva varautuu silloin positiivisesti. Muovipussi saa samalla yhtä suuren negatiivisen varauksen. Lasisauvan ja muovipussin kokonaisvaraus on sama kuin alussa eli nolla, mutta varaukset ovat ryhmittyneet eri tavalla.

Sähkövarauksen säilymislaki on yksi fysiikan tärkeistä säilymislaeista.

Sähkövarauksen säilymislaki
Eristetyssä systeemissä positiivisten ja negatiivisten varausten summa on vakio.

Pohdi ja etsi

2-1. a) Miksi saat joskus autosta poistuessasi sähköiskun, kun kosketat auton metallipintaa?
b) Miksi säiliöautojen alla on maata koskettava metallijohdin?
c) Miksi formula-autot ajavat ennen tankkausta auton runkoa koskettavan metallijohtimen yli?

2-2. a) Hangataan puhallettua ilmapalloa seinään. Miksi ilmapallo tarttuu hangattuun kohtaan?
b) Miksi pieniä sähköiskuja saa esimerkiksi ovenkahvoista talvella helpommin kuin kesällä?
c) Mitkä seuraavista tapahtumista voidaan selittää sähkömagneettisella vuorovaikutuksella?
1) Protoni vetää elektronia puoleensa.
2) Lattia tukee sillä seisovaa henkilöä.
3) Koripallo pomppaa seinästä.

2-3. a) Selitä, miksi kuvassa olevat metallipintaiset, kevyet pallot pysyvät nauhageneraattorin pallon yläpuolella ilmassa.

b) Kampaat sähköopin tunnin alussa muovikammalla puhtaita hiuksiasi. Huomaat, että kampa ja hiukset vetävät toisiaan puoleensa. Selitä, miten voit tutkia, luovuttivatko hiuksesi elektroneja vai ottivatko ne niitä vastaan. Käytettävissäsi on muovipussi ja lasisauva.

2-4. Protonit ja neutronit koostuvat kvarkeista.
a) Selvitä kuuden kvarkin nimet ja sähkövaraukset.
b) Selvitä, mikä vuorovaikutus selittää atomiytimen koossa pysymisen.

Tehtäviä

2-5. a) Selitä aineen mikrorakenteen avulla, mitä tarkoittavat merkinnät Fe^{3+} ja O^{2-}.
b) Ilmoita ionien Fe^{3+} ja O^{2-} sähkövaraus coulombeina.

2-6. a) Kuinka monta alkeisvarausta on 1,0 C:n varauksessa?
b) Kuinka monta ylimääräistä elektronia on kappaleella, jonka varaus on $-4{,}2$ nC?
c) Kappaleen varaus on $+9{,}5$ pC. Kuinka monen elektronin vajaus siinä on?
d) Varaamattomasta alumiinipallosta poistetaan 1,0 miljardia elektronia. Kuinka suuri pallon varaus on coulombeina?

2-7. Eristetyssä systeemissä positiivisten ja negatiivisten varausten summa on vakio. Eristetyssä systeemissä kahden samanlaisen metallipallon A ja B varaukset ovat seuraavat:
a) A: -10 nC ja B: 10 nC
b) A: $-12{,}0$ nC ja B: 17,0 nC
c) A: -10 nC ja B: 2 nC
d) A: 0 nC ja B: -10 nC.
Pallot yhdistetään johtimella. Määritä pallojen varaukset yhdistämisen jälkeen ja ilmoita elektronien siirtymissuunta.

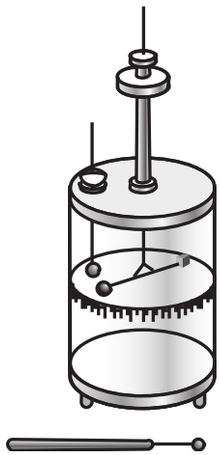
2.2 Coulombin laki

Oppilastyö ▪ Sähköinen voima

1. Varaa kaksi samanlaista langoissaan riippuvaa metallipintaista, kevyttä palloa samanmerkkisiksi. Tutki, miten pallojen välimatka vaikuttaa niiden käyttäytymiseen.

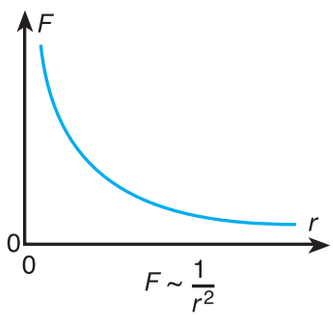
2. Varaa vain toinen pallo ja kosketa sillä varaamatonta palloa, jolloin kummallekin tulee yhtä suuri samanmerkkinen sähkövaraus. Pura toisen pallon sähkövaraus. Kosketa jälleen varatulla pallolla varaamatonta palloa. Toista tämä muutaman kerran. Tutki, miten pallojen sähkövarauksen suuruus vaikuttaa pallojen käyttäytymiseen.

Oppilastyön tulosten perusteella voidaan todeta, että pallojen välinen **sähköinen vuorovaikutus riippuu** pallojen **välimatkasta** ja **varausten suuruudesta**.



Coulombin kiertovaaka.

Ranskalainen *Charles Coulomb* (1736–1806) kehitti 1780-luvulla mittalaitteiston, Coulombin kiertovaa'an. Sen avulla voidaan tutkia riittävällä tarkkuudella tekijöitä, jotka vaikuttavat sähköisen voiman suuruuteen. Vuonna 1784 Coulomb esitteli Ranskan tiedeakatemialle keksimänsä lainalaisuuden, jota nykyään kutsutaan Coulombin laiksi.



Coulombin voima.

Coulombin laki

Hiukkaset, joiden sähkövaraukset ovat Q_1 ja Q_2, kohdistavat toisiinsa voiman, jonka suuruus on suoraan verrannollinen varausten tuloon ja kääntäen verrannollinen hiukkasten välisen etäisyyden neliöön eli

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2},$$

jossa r on hiukkasten välinen etäisyys ja ε_0 sähkövakio eli tyhjiön permittiivisyys. $\varepsilon_0 = 8{,}85419 \cdot 10^{-12} \dfrac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{Nm}^2}$.

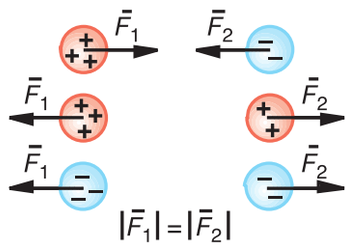
Usein merkitään $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$, jolloin Coulombin laki saa muodon $F = k\dfrac{Q_1 Q_2}{r^2}$ ja **Coulombin lain vakio** arvon

$k = 8{,}98755 \cdot 10^9 \dfrac{\mathrm{Nm}^2}{\mathrm{C}^2}$.

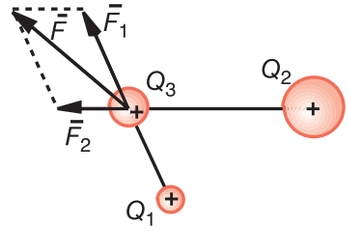
Coulombin lain mukaista sähköistä voimaa kutsutaan **Coulombin voimaksi**. Voiman suunta päätellään varausten merkeistä. Kun varaukset ovat vastakkaismerkkisiä, voima on vetovoima, ja kun ne ovat samanmerkkisiä, voima on hylkimisvoima. Coulombin laki pätee pistemäisille varatuille hiukkasille eli pistevarauksille sekä kappaleille, joiden varausjakauma on pallosymmetrinen. Coulombin voima on etävoima.

Elektronin ja protonin välinen sähköinen vetovoima on noin 10^{39}-kertainen verrattuna niiden väliseen gravitaatiovoimaan. Näin ollen gravitaatiovoimaa ei tarvitse ottaa huomioon tarkasteltaessa näiden hiukkasten välistä voimavaikutusta. Jos tarkastellaan vain sähköisen voiman suuruutta, voidaan merkitä $F = k\dfrac{|Q_1 Q_2|}{r^2}$.

Voiman ja vastavoiman lain perusteella kahden varatun hiukkasen toisiinsa kohdistamat voimat ovat aina vastakkaissuuntaiset ja yhtä suuret riippumatta hiukkasten varauksien suuruudesta.



Pistemäisten varattujen kappaleiden välisiä voimavaikutuksia.



$\bar{F}$ on sähkövarausten Q_1 ja Q_2 varaukseen Q_3 kohdistama kokonaisvoima.

Suhteellisia permittiivisyyksiä ε_r

Eriste	Permittiivisyys
asbesti	2,7
eboniitti	2,7
etanoli	26
kuiva ilma	1,0006
lasi	7
paperi	5
posliini	6
tislattu vesi	81

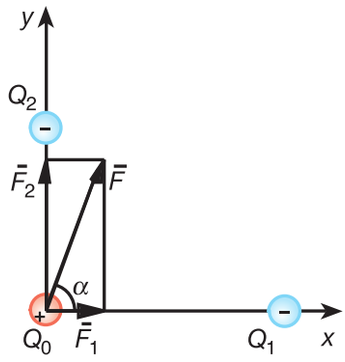
Varattujen hiukkasten välissä oleva eriste heikentää hiukkasten sähköistä vuorovaikutusta. **Eristeen suhteellinen permittiivisyys** ε_r kuvaa, miten eriste vaikuttaa sähköiseen voimaan. Eristeiden ja suhteellisen permittiivisyyden merkitystä tarkastellaan lisää myöhemmin tällä kurssilla (ks. sivu 123).

Coulombin laki eristeessä

Kahden pistemäisen, eristeessä olevan varatun hiukkasen välisen sähköisen voiman suuruus on

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}\cdot\frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{k}{\varepsilon_r}\frac{Q_1 Q_2}{r^2}.$$

Esimerkki 1



$\bar{F}_1$ on varauksen Q_1 aiheuttama voima ja $\bar{F}_2$ varauksen Q_2 aiheuttama voima.

Origossa on 6,0 nC:n suuruinen pistevaraus, pisteessä (4, 0) −9,0 nC:n varaus ja pisteessä (0, 2) −5,0 nC:n varaus. Varaukset ovat tyhjiössä. Koordinaatiston pituusyksikkö on 1,0 cm. Laske origossa olevaan varaukseen kohdistuva sähköinen voima.

$Q_0 = 6{,}0\ \text{nC}, \quad Q_1 = -9{,}0\ \text{nC}, \quad Q_2 = -5{,}0\ \text{nC}, \quad r_1 = 0{,}040\ \text{m}, \quad r_2 = 0{,}020\ \text{m}, \quad k = 8{,}98755 \cdot 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2$

Sähkövaraus Q_1 kohdistaa origossa olevaan varaukseen Q_0 sähköisen voiman. Sen suuruus on Coulombin lain mukaan

$$F_1 = k \cdot \frac{|Q_0 Q_1|}{r_1^2} = 8{,}98755 \cdot 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{6{,}0\ \text{nC} \cdot 9{,}0\ \text{nC}}{(0{,}040\ \text{m})^2}$$

$$\approx 0{,}303330\ \text{mN}$$

ja suunta positiivisen x-akselin suuntaan.

Vastaavasti varauksen Q_2 varaukseen Q_0 kohdistaman voiman suuruus on

$$F_2 = k \cdot \frac{|Q_0 Q_2|}{r_2^2} = 8{,}98755 \cdot 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{6{,}0\ \text{nC} \cdot 5{,}0\ \text{nC}}{(0{,}020\ \text{m})^2}$$

$$\approx 0{,}674066\ \text{mN}$$

ja suunta positiivisen y-akselin suuntaan.

Origossa olevaan varaukseen kohdistuva kokonaisvoima on $\bar{F} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2$. Voiman suuruus on

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{(0{,}303330\ \text{mN})^2 + (0{,}674066\ \text{mN})^2}$$

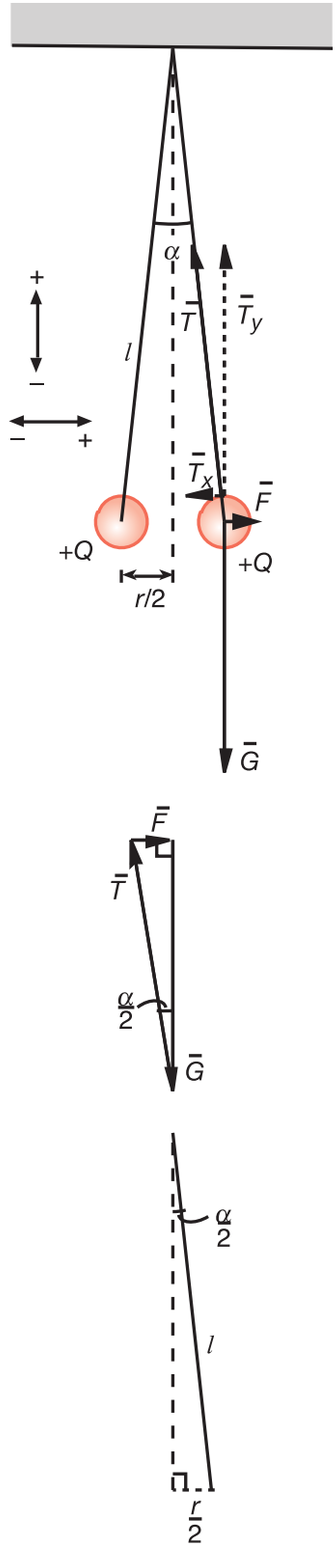
$$\approx 0{,}74\ \text{mN}.$$

Kokonaisvoiman suunta saadaan suorakulmaisesta kolmiosta:

$$\tan\alpha = \frac{F_2}{F_1} = \frac{0{,}674066\ \text{mN}}{0{,}303330\ \text{mN}}, \text{ josta kulma } \alpha \approx 66°.$$

Voiman suuruus on 0,74 mN ja voiman suunta 66° kuvan mukaisesti.

Esimerkki 2



Eveliina ripusti oppitunnilla kaksi kevyttä palloa 85 cm pitkien, ohuiden eristelankojen päihin. Palloihin tuotiin yhtä suuret positiiviset sähkövaraukset. Tällöin ripustuslankojen väliseksi kulmaksi tuli 12,0°. Laske pallojen varaus. Kummankin pallon massa oli 3,5 g.

$l = 0{,}85\ \text{m}, \quad \alpha = 12{,}0°, \quad m = 3{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{kg}, \quad \varepsilon_\text{r} = 1{,}0006,$
$k = 8{,}98755 \cdot 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2$

Oletetaan, että eristelankojen massat ovat vähäisiä. Koska pallojen varaukset ovat samanmerkkisiä, palloihin kohdistuvat Coulombin voimat ovat hylkiviä. Voimien suuruus on $F = \dfrac{k}{\varepsilon_\text{r}} \dfrac{Q_1 Q_2}{r^2} = \dfrac{k}{\varepsilon_\text{r}} \dfrac{Q^2}{r^2}$, jossa r on pallojen keskipisteiden välinen etäisyys ja Q kummankin pallon varaus.

Tarkastellaan kuvan oikeanpuoleista palloa, johon kohdistuvat voimat ovat paino $\overline{G}$, Coulombin voima $\overline{F}$ ja langan tukivoima $\overline{T}$. Koska pallo on tasapainossa, Newtonin II lain mukaan voimien summa on nolla eli $\sum \overline{F} = \overline{T} + \overline{F} + \overline{G} = \overline{0}$. Suorakulmaisesta kolmiosta saadaan yhtälö $\tan \dfrac{\alpha}{2} = \dfrac{F}{G}$, eli voiman $\overline{F}$ suuruus on

$$F = G \tan \frac{\alpha}{2} = mg \tan \frac{\alpha}{2}.$$

Toisaalta suorakulmaisesta kolmiosta saadaan $\sin \dfrac{\alpha}{2} = \dfrac{r/2}{l}$, joten pallojen välinen etäisyys on $r = 2l \cdot \sin \dfrac{\alpha}{2}$.

Yhtälöstä $F = \dfrac{k}{\varepsilon_\text{r}} \dfrac{Q^2}{r^2}$ saadaan varaukseksi $Q = \sqrt{\dfrac{F \varepsilon_\text{r} r^2}{k}}$.

Sijoitetaan etäisyyden ja voiman yhtälöt varauksen yhtälöön. Varaukseksi saadaan

$$Q = \sqrt{\frac{F \varepsilon_\text{r} r^2}{k}} = \sqrt{\frac{mg \cdot \tan \dfrac{\alpha}{2} \cdot \varepsilon_\text{r} \cdot \left(2l \sin \dfrac{\alpha}{2}\right)^2}{k}}$$

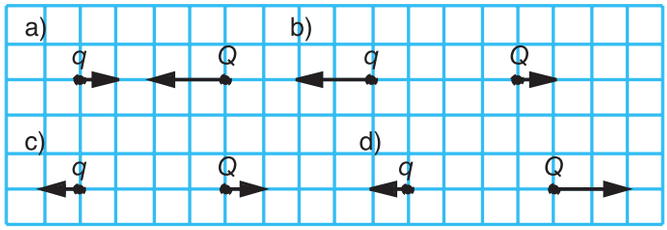
$$= \sqrt{\frac{3{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2 \cdot \tan 6{,}0° \cdot 1{,}0006 \cdot (2 \cdot 0{,}85\ \text{m} \cdot \sin 6{,}0°)^2}{8{,}98755 \cdot 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2}}$$

$$\approx 0{,}11 \cdot 10^{-6}\ \text{C}.$$

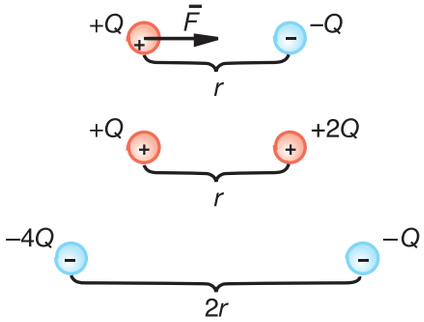
Kummankin pallon varaus on 0,11 μC.

2-8. Miten sähköisen voiman suuruus muuttuu, jos kahden pistemäisen varautuneen kappaleen
a) etäisyys kaksinkertaistuu ja varaukset säilyvät samoina
b) etäisyys pienenee kolmasosaan ja varaukset säilyvät samoina
c) etäisyys kaksinkertaistuu ja molemmat varaukset muuttuvat nelinkertaisiksi?

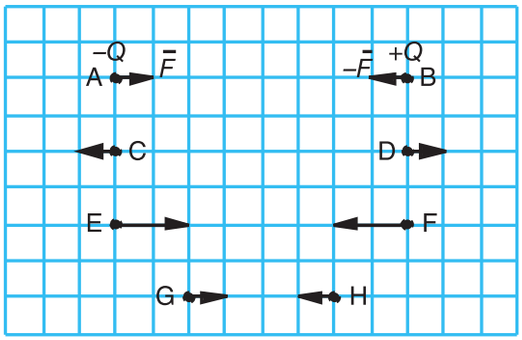
2-9. Kahden negatiivisesti varautuneen hiukkasen varaukset ovat q ja Q siten, että $Q = 2q$. Missä piirroksessa sähköiset voimat on piirretty oikein?



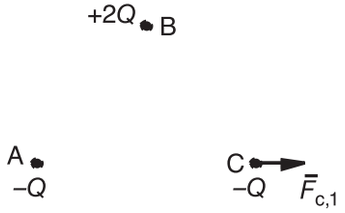
2-10. Alla olevissa kuvissa tarkastellaan varattuja kappaleita ja niiden välisiä voimia pareittain. Ylimpään kuvaan on piirretty yhteen kappaleeseen vaikuttava sähköinen voima. Piirrä muihin kappaleisiin kohdistuvat sähköiset voimat oikeansuuntaisina ja -pituisina.



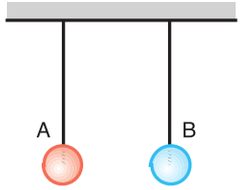
2-11. Kuvaan on merkitty kappaleiden A ja B varaukset ja kappaleisiin kohdistuvat voimat.
a) Anna yksi esimerkki muiden kappaleiden C, D, E, F, G ja H varauksista.
b) Miksi a-kohdassa pyydetään vain yksi esimerkki varauksista?



2-12. Alla olevassa piirroksessa on kolme varattua pistemäistä kappaletta A, B ja C, jotka ovat sähköisessä vuorovaikutuksessa keskenään ja yhtä kaukana toisistaan.
a) Kappaleeseen C kohdistuvista voimista kuvaan on piirretty voima $\bar{F}_{C,1}$. Mistä voima aiheutuu?
b) Piirrä kuvaan pareittain kahden kappaleen A ja B, B ja C sekä A ja C vuorovaikutuksesta kuhunkin kappaleeseen kohdistuvat sähköiset voimat. Piirrä myös kuhunkin kappaleeseen kohdistuva sähköinen kokonaisvoima.
c) Mihin suuntaan kappale B alkaa liikkua, jos kaikki varaukset ovat aluksi paikallaan?



2-13. Kaksi pientä palloa ripustetaan silkkilankoihin kuvan mukaisesti. Minkälaiset kulmat langat muodostavat luotiviivan kanssa, kun
a) $m_A = m_B$ ja $Q_A = Q_B$
b) $m_A = m_B$ ja $Q_A > Q_B$
c) $m_A > m_B$ ja $Q_A = Q_B$?



2-14. Kaksi lähekkäin olevaa positiivisesti varattua pientä metallipalloa riippuu ilmassa ohuista langoista. Lankojen välillä on tietty kulma. Miten kulma muuttuu, kun pallot pannaan veteen?

Tehtäviä

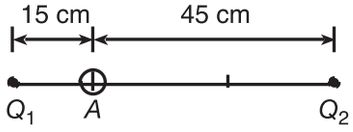
2-15. Kaksi 4,5 mC:n suuruista pistevarausta on ilmassa 2,5 m:n etäisyydellä toisistaan. Laske, kuinka suurella voimalla varaukset vaikuttavat toisiinsa
a) ilmassa b) vedessä.

2-16. Kaksi tyhjiössä olevaa pistemäistä varausta on 17 cm:n etäisyydellä toisistaan. Varausten välinen vetovoima on 19 mN. Laske toinen varaus, kun toinen on 2,5 μC.

2-17. Laske vetyatomin elektronin ja protonin välinen
a) sähköinen vetovoima b) gravitaatiovoima kun hiukkasten etäisyydeksi arvioidaan $5 \cdot 10^{-11}$ m.

2-18. Kaksi samanlaista metallikuulaa on tyhjiössä. Kuulien keskipisteiden välinen etäisyys on 18 cm. Toisen kuulan varaus on 18 nC ja toisen −8,0 nC. Kuulat yhdistetään hetkeksi johtimella toisiinsa. Kuinka suuri on kuulien välinen sähköinen voima yhdistämisen jälkeen?

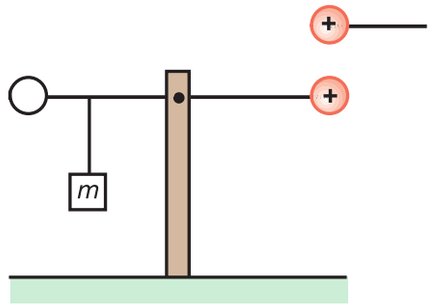
2-19. Pieni hopeoitu korkkipallo, jonka varaus on +3,0 nC ja massa pieni, pääsee liikkumaan varattuja kappaleita yhdistävässä eristelangassa tyhjiössä. Kappaleiden varaukset ovat $Q_1 = +16$ nC ja $Q_2 = +4{,}0$ nC. Kuinka suuri sähköinen voima kohdistuu palloon kohdassa A?



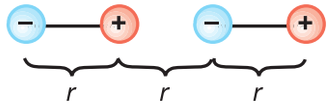
2-20. Origossa on +7,5 μC:n pistevaraus, x-akselilla 3,5 m:n päässä +9,0 μC:n varaus ja y-akselilla 3,0 m:n päässä −2,5 μC:n varaus. Varaukset ovat ilmassa. Laske origossa olevaan varaukseen kohdistuva voima.

2-21. Kaksi pientä palloa riippuu ilmassa 2,5 m pitkien eristelankojen päässä. Langat on kiinnitetty samaan ripustuspisteeseen. Pallojen massat ovat 12 mg ja välimatka on 11 cm. Laske pallojen (yhtä suuret) varaukset.

2-22. Kevyen eristetangon molemmissa päissä on pingispallo. Tanko on kiinnitetty keskikohdastaan siten, että se pääsee herkästi kiertymään pystytasossa. Eristetangon pituus on 0,44 m. Toiseen pingispalloon tuodaan varaus 0,50 μC ja sen yläpuolelle 8,6 cm:n etäisyydelle 0,50 μC:n varaus.
a) Mihin suuntaan tanko pyrkii kiertymään?
b) Mihin kohtaan tankoa 0,100 kg:n massainen punnus tulisi ripustaa, jotta tanko pysyisi vaakasuorassa asennossa?



2-23. Kaksi dipolia on kuvan mukaisessa asennossa tyhjiössä. Dipoli muodostuu kahdesta hiukkasesta, joiden varaukset ovat 0,10 μC ja −0,10 μC. Hiukkasten välimatka on $r = 1{,}5$ cm.
a) Laske voima, jolla vasemmanpuoleinen dipoli vaikuttaa oikeanpuoleiseen dipoliin.
b) Hylkivätkö dipolit toisiaan?
c) Kumpikin dipoli on sähköisesti neutraali. Miksi niiden välillä on kuitenkin voimavaikutus?



Ilmakehän sähkökentän voimakkuus voi olla poutasäällä 100 V/m. Eiffel-tornin huipun ja maanpinnan välinen jännite on silloin noin 32 kV.

Kopiokoneen ja tulostimen toiminta perustuu mustepisaran ohjailemiseen sähkökentän avulla. Pisaran paikka tulostuspaperilla riippuu pisaraan vaikuttavista sähköisistä voimista.

2.3 Sähkökenttä

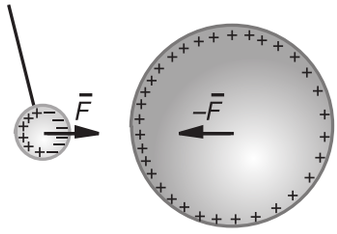
Oppilastyö ▪ Sähkökenttä

1. Hankaa ilmapalloa hiuksiisi. Vie ilmapallo ensin kauas hiuksista ja tuo se sitten hiuksia kohti. Mitä havaitset?

2. Vie kevyt, varaamaton alumiinifoliolla päällystetty pallo hitaasti kohti nauhageneraattorin varattua kupua, kunnes pallo koskettaa sitä. Pidä pallo edelleen generaattorin kuvun lähellä. Mitä havaitset?

Jokaisen varatun kappaleen ympärillä on **sähkökenttä**. Kun kenttään viedään varattu testikappale, kenttä ilmenee kappaleeseen kohdistuvana voimana. Varattu kappale on **sähkökenttänsä välityksellä vuorovaikutuksessa** muiden varattujen kappaleiden kanssa. Oppilastyössä sähköisesti varattu ilmapallo on vuorovaikutuksessa varattujen hiuksien kanssa.

Oppilastyön kohdassa 2 generaattorin positiivisesti varattu pallo vetää puoleensa alumiinin elektroneja. Näin alkujaan varauksettomaan alumiinipalloon syntyy generaattorin puolelle negatiivinen varaus, joka on lähempänä generaattorin palloa kuin alumiini-



pallon toiselle puolelle jäävä positiivinen varaus. Coulombin lain mukaisesti alumiinipalloon kohdistuu voima, joka vetää sitä kohti generaattorin kupua. Jos pallot koskettavat toisiaan, alumiinipallo luovuttaa kosketuksessa generaattorin pallolle elektroneja, minkä jälkeen pallot hylkivät toisiaan. Kappaleiden välinen sähköinen etävuorovaikutus selitetään sähkökentän avulla.

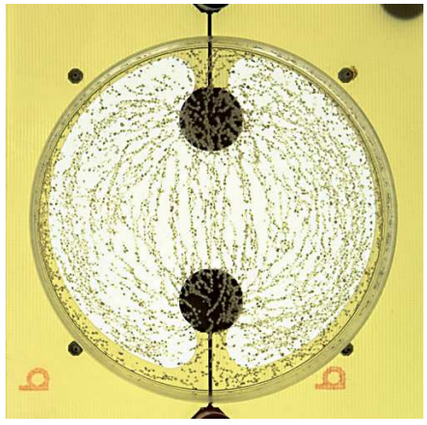
Sähkökenttä
Varatun kappaleen ympärillä on sähkökenttä.
Kun kenttään viedään pistevaraus, kentän olemassaolo voidaan havaita varaukseen kohdistuvana sähköisenä voimana.
Kappaleiden välinen sähköinen etävuorovaikutus selitetään sähkökentän avulla.

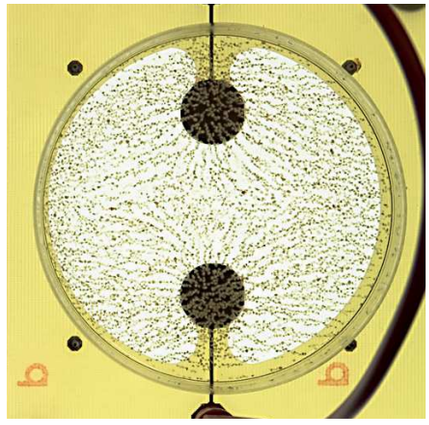
Sähkökentän kenttäviivat

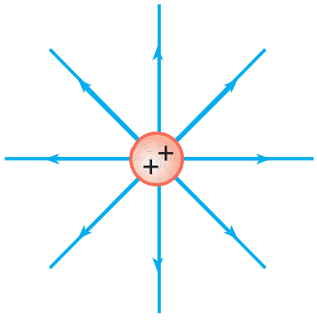
Oppilastyö ▪ Sähkökentän kenttäviivat
1. Aseta laakeaan muoviastiaan yksi elektrodi. Kaada astiaan risiiniöljyä ja ripottele öljyyn mannasuurimoita. Yhdistä risiiniöljyssä oleva elektrodi nauhageneraattoriin tai influenssikoneeseen. Miten mannasuurimot asettuvat, kun elektrodi saa sähkövarauksen?
2. Aseta astiaan vuorotellen erilaisia metallielektrodeja. Voit käyttää esimerkiksi palloa, umpinaista ympyrälevyä, pisaran muotoista kappaletta ja pystysuorassa olevan metallijohtimen päätä. Aseta astiaan myös kaksi erimerkkistä tai samanmerkkistä elektrodia ja varaa molemmat.

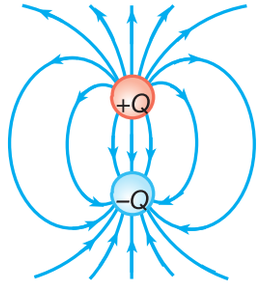
Michael Faraday (1791–1867) toi fysiikkaan vuonna 1835 käsitteen **kenttäviivat** havainnollistamaan sähkökenttää. Sähkökentän kenttäviivat lähtevät positiivisesti varautuneen kappaleen pinnasta ja päättyvät negatiivisesti varatun kappaleen pintaan. Kenttäviivoilla kuvataan sähkökentän suuntaa ja muotoa. Viivojen tiheys ilmentää kentän voimakkuutta.

Oppilastyössä varattujen elektrodien ympärillä on sähkökenttä. Mannasuurimot asettuvat risiiniöljyssä jonoiksi, jotka kuvaavat kenttäviivoja. Kun öljyssä on kaksi elektrodia, kummallakin niistä on oma sähkökenttä. Kokonaiskenttä on näiden kahden kentän vektorisumma. Mannasuurimojonot kuvaavat kokonaiskentän kenttäviivoja. (Katso Eriste sähkökentässä, s. 121.)

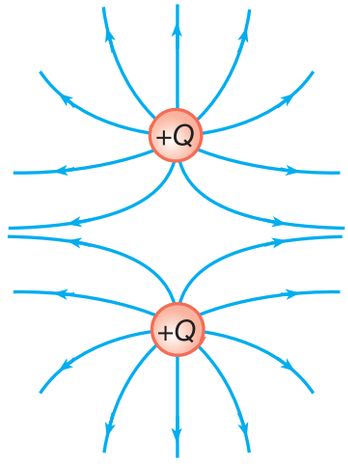




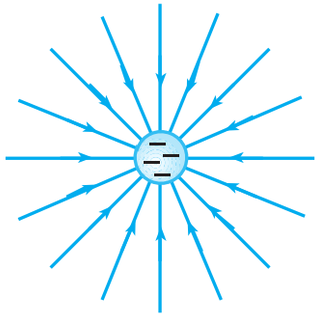




Kahden itseisarvoltaan yhtä suuren, erimerkkisen varauksen sähkökentän kenttäviivoja.



Kahden yhtä suuren, samanmerkkisen varauksen sähkökentän kenttäviivoja.

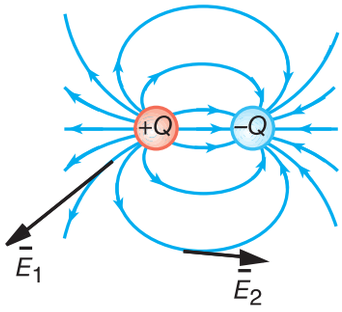


Yksittäisten pistemäisten varausten sähkökentän kenttäviivoja.

Sähkökentän kenttäviivat

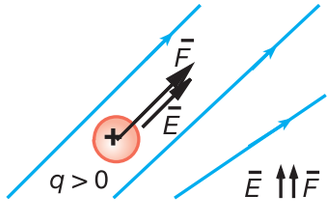
Sähkökentän kenttäviivoilla kuvataan sähkökentän suuntaa, muotoa ja voimakkuutta.

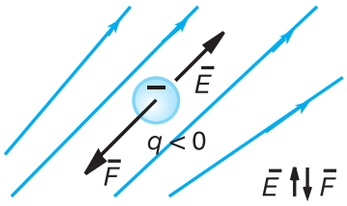
Kenttäviivat lähtevät positiivisesti varautuneesta kappaleesta ja päättyvät negatiivisesti varattuun kappaleeseen.



Mitä tiheämmässä kenttäviivoja jollakin alueella on, sitä voimakkaampi sähkökenttä siinä on. Kenttäviivan pisteeseen piirretty **tangentti kuvaa sähkökentän suuntaa** tässä pisteessä. Edellä on tarkasteltu sähkökentän kaksiulotteisia malleja, mutta sähkökenttä on kuitenkin kolmiulotteinen.

Sähkökentän voimakkuutta voidaan tutkia kentässä olevan kappaleen avulla, kun kappaleella on pieni varaus q (testivaraus). Testivaraus on siis niin pieni, että se itse ei muuta tutkittavaa sähkökenttää merkittävästi. Kappaleeseen kohdistuva sähköinen voima voi aiheuttaa kappaleen asennon muuttumisen tai antaa kappaleelle kiihtyvyyden.





Sähkökentän voimakkuus
Sähkökentän voimakkuus $\bar{E}$ on kentässä olevaan varattuun hiukkaseen kohdistuvan sähköisen voiman ja kappaleen sähkövarauksen suhde

$$\bar{E} = \frac{\bar{F}}{q}.$$

Sähkökentän voimakkuus $\bar{E}$ osoittaa sähkökentän (kenttäviivojen) suunnan.
Jos sähkökentässä olevan hiukkasen varaus on positiivinen, kentän voimakkuuden suunta on sama kuin hiukkaseen vaikuttavan sähköisen voiman suunta.
Jos hiukkasen varaus on negatiivinen, kentän voimakkuuden suunta on sähköisen voiman suuntaan nähden vastakkainen.

SI-järjestelmässä sähkökentän voimakkuuden yksikkö on

$$[E] = \frac{[F]}{[q]} = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{C}} = 1\,\mathrm{N/C}.$$

Sähkökentän voimakkuutta $\bar{E}$ kutsutaan usein lyhyesti sähkökentäksi. Huomaa, että symbolilla Q (iso kirjain) merkitään varausta, jonka sähkökenttää tutkitaan, ja testivarauksella q (pieni kirjain) tutkitaan kenttää.

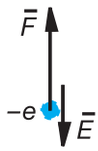
Esimerkki 3

Elektronia kiihdytetään sähkökentässä. Elektronin kiihtyvyyden suuruus on tarkasteluhetkellä $1{,}5 \cdot 10^{16}\ \mathrm{m/s^2}$ ja suunta ylös. Laske elektronin kohdalla olevan sähkökentän voimakkuus.

$a = 1{,}5 \cdot 10^{16}\ \mathrm{m/s^2}, \quad |q| = e = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C},$
$m = 9{,}1093897 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}$

Newtonin II lain mukaan elektronin liikeyhtälö on $\sum \bar{F} = m\bar{a}$. Elektronin massa on hyvin pieni, joten siihen kohdistuva paino voidaan jättää huomioimatta. Sähköinen voima on elektronia kiihdyttävä voima. Sen suunta on alhaalta ylös eli sama kuin kiihtyvyyden suunta. Sovitaan voiman suunta positiiviseksi. Sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan

$$E = \frac{F}{|q|} = \frac{ma}{e} = \frac{9{,}1093897 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg} \cdot 1{,}5 \cdot 10^{16}\ \mathrm{m/s^2}}{1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}} \approx 85\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{C}}.$$



Koska elektronin sähkövaraus on negatiivinen, siihen vaikuttava sähköinen voima on vastakkaissuuntainen kuin sähkökentän voimakkuus. Sähkökentän kenttäviivat suuntautuvat siten elektronin kohdalla ylhäältä alas.

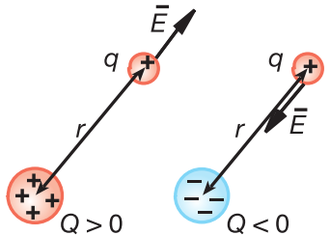
Sähkökentän voimakkuus on 85 kN/C ja suunta alas.

Pistevarauksen sähkökenttä

Oppilastyö ▪ Kenttäviivat pistevarauksen sähkökentässä
Kiinnitä vappuhuiskaan varreksi ohut metallisauva ja pane sauva pystyyn nauhageneraattorin päälle. Varaa generaattori ja tarkkaile paperiliuskoja.

Pistemäisen sähkövarauksen Q ympärillä olevan sähkökentän sähköistä vuorovaikutusta voidaan tutkia viemällä kentän mielivaltaiseen pisteeseen pieni testivaraus q. Kentässä olevaan varaukseen q kohdistuu sähköinen voima. Määritelmän mukaan sähkökentän voimakkuus on $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. Pistevarauksen Q sähkökentän voimakkuus tyhjiössä saadaan jakamalla Coulombin voima testivarauksella q eli

$$E = \frac{F}{q} = \frac{\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qQ}{r^2}}{q} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2} = k\frac{Q}{r^2}.$$

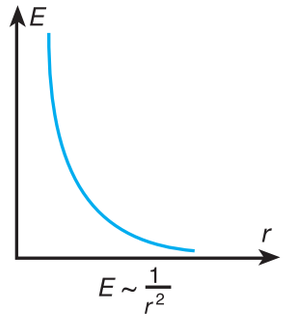


Pistevarauksen sähkökenttä

Pistevarauksen Q sähkökentän (Coulombin kentän) voimakkuuden suuruus tyhjiössä etäisyydellä r varauksesta on

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2} = k\frac{Q}{r^2}.$$

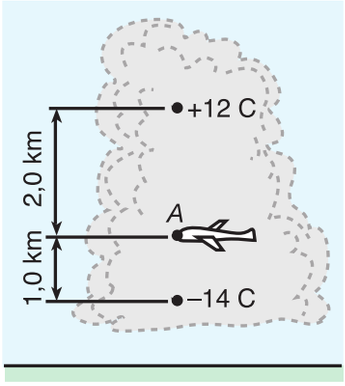
Pistevarauksen sähkökentän voimakkuuden $\vec{E}$ suunta on varauksesta Q poispäin, jos varaus Q on positiivinen, ja varausta Q kohti, jos varaus Q on negatiivinen.



Jos varaus Q on eristeessä, sähkökentän voimakkuuden suuruus on $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}\frac{Q}{r^2} = \frac{k}{\varepsilon_r}\frac{Q}{r^2}$, jossa ε_r on eristeen suhteellinen permittiivisyys. Yhtälö pätee myös varatun pallonmuotoisen kappaleen ulkopuolella, jos varausjakauma on pallosymmetrinen, kun r on etäisyys pallon keskipisteestä.

Oppilastyössä metallisauvan päähän kerääntyy varaustihentymä, jota voidaan pitää likimain pistemäisenä. Vaikka paperi on eriste, paperiliuskat saavat samanmerkkisen varauksen kuin nauhageneraattorin pallolla on. Varattuihin paperiliuskoihin kohdistuu hylkivä Coulombin voima. Kevyet liuskat kuvaavat kolmiulotteisesti likimain pistemäisen varauksen kenttäviivoja.

Esimerkki 4



Ukkospilven varausjakaumaa voidaan kuvata yksinkertaisella mallilla, joka koostuu kahdesta pistevarauksesta 12 C ja −14 C. Laske sähkökentän voimakkuus lentokoneen kohdalla pisteessä A, joka sijaitsee varausten välisellä janalla.

$Q_1 = +12\ \text{C}, \quad Q_2 = -14\ \text{C}, \quad r_1 = 2{,}0\ \text{km}, \quad r_2 = 1{,}0\ \text{km},$
$k = 8{,}98755 \cdot 10^9\ \text{Nm/C}^2, \quad \varepsilon_\text{r} = 1{,}0006$

Varauksen Q_1 sähkökentän voimakkuus $\overline{E}_1$ pisteessä A on suuruudeltaan

$$E_1 = \frac{k}{\varepsilon_\text{r}} \frac{Q_1}{r_1^2} = \frac{8{,}98755 \cdot 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2}{1{,}0006} \cdot \frac{12\ \text{C}}{(2{,}0\ \text{km})^2}$$
$$= 26{,}9465\ \text{kN/C}.$$

Koska varaus Q_1 on positiivinen, sähkökentän voimakkuus $\overline{E}_1$ suuntautuu poispäin varauksesta eli pisteestä A alaspäin.

Varauksen Q_2 sähkökentän voimakkuus $\overline{E}_2$ pisteessä A on suuruudeltaan

$$E_2 = \frac{k}{\varepsilon_\text{r}} \frac{|Q_2|}{r_2^2} = \frac{8{,}98755 \cdot 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2}{1{,}0006} \cdot \frac{14\ \text{C}}{(1{,}0\ \text{km})^2}$$
$$= 125{,}7502\ \text{kN/C}.$$

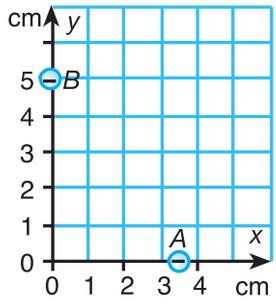
Koska varaus Q_2 on negatiivinen, $\overline{E}_2$ suuntautuu varaukseen päin eli pisteestä A alas.

Sähkökentän voimakkuus pisteessä A on $\overline{E} = \overline{E}_1 + \overline{E}_2$. Valitaan suunta alas positiiviseksi, jolloin sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan

$E = E_1 + E_2 = 26{,}9465\ \text{kN/C} + 125{,}7502\ \text{kN/C} \approx 150\ \text{kN/C}.$

Sähkökentän voimakkuus lentokoneen kohdalla on suuruudeltaan 150 kN/C, ja kenttä suuntautuu alaspäin. Lentokone on ukkospilvessä, ja kostean ilman suhteellinen permittiivisyys on suurempi kuin kuivan ilman. Siksi sähkökentän voimakkuuden arvo on todellisuudessa pienempi kuin laskettu arvo.

Esimerkki 5



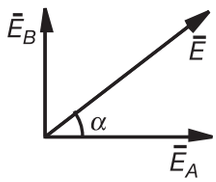
Kaksi pistemäistä kappaletta on tislatussa vedessä koordinaatiston pisteissä $A(3{,}5\text{ cm};\ 0{,}0\text{ cm})$ ja $B(0{,}0\text{ cm};\ 5{,}0\text{ cm})$. Pisteessä A olevan kappaleen varaus on $-4{,}8$ nC ja pisteessä B olevan kappaleen $-7{,}3$ nC. Laske sähkökentän voimakkuus origossa.

$A = (3{,}5\text{ cm};\ 0{,}0\text{ cm}),\quad B = (0{,}0\text{ cm};\ 5{,}0\text{ cm}),\quad Q_A = -4{,}8\text{ nC},$
$Q_B = -7{,}3\text{ nC},\quad \varepsilon_\mathrm{r} = 81,\quad k = 8{,}98755 \cdot 10^9\ \mathrm{Nm/C^2}$

Lasketaan kummankin varauksen sähkökentän voimakkuuden suuruus origossa.

Varauksen Q_A sähkökentän voimakkuus origossa on suuruudeltaan

$$E_A = \frac{k}{\varepsilon_\mathrm{r}} \cdot \frac{|Q_A|}{r^2} = \frac{8{,}98755 \cdot 10^9\ \mathrm{Nm^2/C^2}}{81} \cdot \frac{4{,}8 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{C}}{(0{,}035\ \mathrm{m})^2}$$
$$\approx 0{,}434772\ \mathrm{kN/C}$$



ja suunta positiivisen x-akselin suunta.

Varauksen Q_B sähkökentän voimakkuus origossa on suuruudeltaan

$$E_B = \frac{k}{\varepsilon_\mathrm{r}} \cdot \frac{|Q_B|}{r^2} = \frac{8{,}98755 \cdot 10^9\ \mathrm{Nm^2/C^2}}{81} \cdot \frac{7{,}3 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{C}}{(0{,}050\ \mathrm{m})^2}$$
$$\approx 0{,}324003\ \mathrm{kN/C}$$

ja suunta positiivisen y-akselin suunta.

Sähkökentän voimakkuuden $\bar{E}$ suuruus on

$$E = \sqrt{E_A^2 + E_B^2} = \sqrt{(0{,}434772\ \mathrm{kN/C})^2 + (0{,}324003\ \mathrm{kN/C})^2}$$
$$\approx 0{,}54\ \mathrm{kN/C}.$$

Sähkökentän voimakkuuden $\bar{E}$ suunta positiivisen x-akselin suhteen on

$$\tan\alpha = \frac{|E_B|}{|E_A|} = \frac{0{,}324003\ \mathrm{kN/C}}{0{,}434772\ \mathrm{kN/C}},\ \text{josta kulma on } \alpha \approx 37°.$$

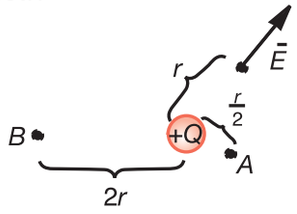
Sähkökentän voimakkuus on 0,54 kN/C, ja sen suunta muodostaa 37°:n kulman positiivisen x-akselin kanssa.

Pohdi ja etsi

2-24. a) Miksi negatiivisia varauksia kutsutaan joskus sähkökentän nieluiksi?
b) Sähkökentän voimakkuuden tunnus on $\vec{E}$. Minkä muiden fysiikan suureiden tunnus on myös E?

2-25. a) Miksi asunnossa, jonka suhteellinen kosteus on pieni, on ilmassa enemmän huonepölyä kuin asunnossa, jonka suhteellinen kosteus on suuri?
b) Missä on voimakkaita sähkökenttiä? Miten sähkökenttä muuttuu Maan pinnalla ukkosmyrskyn alkaessa?

2-26. Kuvaan on piirretty sähkökentän voimakkuus $\vec{E}$, joka kuvaa kyseisen kentän voimakkuutta tietyssä pisteessä. Piirrä kuvaan sähkökentän voimakkuusvektori pisteissä A ja B. Jos pisteissä A ja B olisi elektroni, mikä olisi elektroniin vaikuttavan sähköisen voiman suunta näissä pisteissä?



2-27. a) Voivatko hiukset nousta pystyyn ukkospilven alla?
b) Pohdi sanonnan ”salama ei iske kahta kertaa samaan paikkaan” paikkansapitävyyttä.
c) Selvitä, miten ukkospilvi syntyy ja mistä ukkosen jyrinä johtuu.
d) Selvitä, mitä ukonilmaan liittyvällä syöksyvirtauksella tarkoitetaan.

2-28. Benjamin Franklin teki vuonna 1752 kuuluisan leijakokeensa, jonka perusteella voitiin ensimmäisen kerran osoittaa, että salama on sähköinen luonnonilmiö.
a) Millainen laitteisto Franklinilla oli? Miksi koe oli hengenvaarallinen?
b) Selitä, miksi salaman sähköä saatiin varastoitua.
c) Miten Franklin itse suojautui salamalta?

Tehtäviä

2-29. Piirrä pääpiirteittäin kuva sähkökentästä, jonka muodostavat pistevaraukset
a) −6 nC ja 10 nC b) 12 nC ja 8 nC.

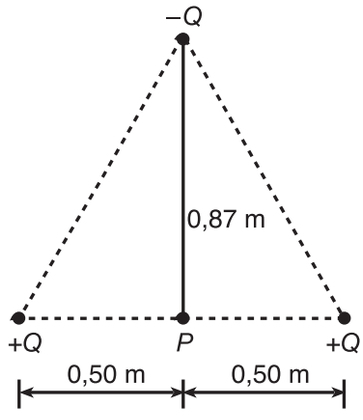
2-30. Sähköinen voima vaikuttaa pistemäiseen
a) 1,0 nC:n varaukseen positiivisen x-akselin suuntaisella 2,5 mN:n voimalla
b) −2,0 nC:n varaukseen positiivisen x-akselin suuntaisella 4,0 mN:n voimalla.
Määritä sähkökentän voimakkuus.

2-31. a) Sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan 100 N/C. Kuinka suuri sähköinen voima vaikuttaa kentässä olevaan 10 nC:n pistevaraukseen?
b) Sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan 1,8 MN/C, ja kentässä olevaan pistevaraukseen vaikuttava voima on 12 mN. Sähkökentän voimakkuuden suunta on voiman suuntaan nähden vastakkainen. Määritä varaus.

2-32. Vetyatomissa protonin ja elektronin välimatka on noin 52,9 pm. Laske protonin sähkökentän voimakkuus elektronin kohdalla.

2-33. a) Sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan 2,5 N/C. Laske elektronin kiihtyvyys tässä kentässä.
b) Tasasivuisen kolmion ABC kärjessä A on positiivinen varaus ja kärjessä B itseisarvoltaan yhtä suuri negatiivinen varaus. Määritä piirtämällä sähkökentän voimakkuuden suunta pisteessä C.

2-34. Tasakylkisen kolmion kärkiin on sijoitettu itseisarvoltaan $1{,}0 \cdot 10^{-6}$ C:n varaukset oheisen kuvan mukaisesti. Kolmion kannan pituus on 1,0 metriä. Systeemi sijaitsee tyhjiössä. Laske sähkökentän voimakkuus pisteessä P.
[Joensuun yliopisto 1993 (osa)]

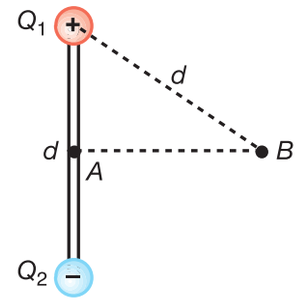


2-35. a) Laske sähkökentän voimakkuus tyhjiössä 26 cm:n päässä pistemäisestä kappaleesta, jonka sähkövaraus on −45 nC.
b) Kuinka suuri sähköinen voima vaikuttaa 26 cm:n etäisyydellä olevaan hiukkaseen, jonka sähkövaraus on 15 pC?

2-36. Kaksi itseisarvoltaan 0,75 μC:n pistevarausta ovat tyhjiössä 36 cm:n päässä toisistaan. Laske sähkökentän voimakkuus varausten puolivälissä, kun varaukset ovat
a) samanmerkkiset b) erimerkkiset.

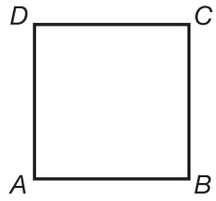
2-37. Tyhjiössä on kaksi pistevarausta. Pistevaraus +1,5 nC on koordinaatiston pisteessä (7,0 cm; 0,0 cm) ja pistevaraus −6,5 nC pisteessä (0,0 cm; 15 cm). Laske sähkökentän voimakkuus origossa.

2-38. Oheisessa kuvassa on fysiikan demonstraatioissa käytettävä sähködipoli. Se koostuu kahdesta pienestä varatusta johdepallosta ja niiden välisestä eristeputkesta. Pallojen varaukset ovat $Q_1 = +16$ nC, $Q_2 = -16$ nC, ja pallojen keskipisteiden välinen etäisyys d on 14 cm. Määritä dipolin sähkökentän voimakkuus putken keskinormaalin pisteissä A ja B. [K2005, 7]

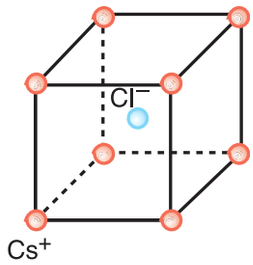


2-39. Pistemäiset varaukset +1,0 μC ja +2,0 μC ovat tyhjiössä 0,10 m:n etäisyydellä toisistaan. Missä kohdassa varausten sähkökentän voimakkuus on nolla?

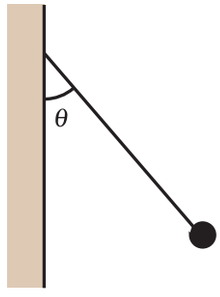
2-40. Neliön kolmessa kärkipisteessä A, B ja C on kussakin pistemäinen varaus. Näiden varausten yhteenlaskettu sähkökentän voimakkuus on nolla neljännessä kärkipisteessä D. Kaksi varauksista on suuruudeltaan $+1{,}6\ \mu C$, ja ne ovat pisteissä A ja C. Kuinka suuri on kolmas varaus pisteessä B? Varaukset ovat tyhjiössä.



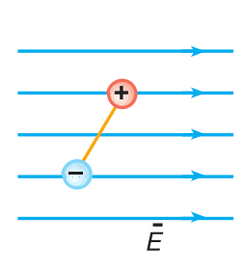
2-41. Cesiumkloridikiteen muoto näkyy kuvassa. Kidekuution särmän pituus on 0,40 nm. Laske sähkökentän voimakkuus kiteen keskipisteessä (Cl^--ionin kohdalla).



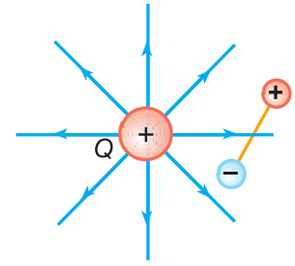
2-42. Sähkökentän voimakkuus varatun johdepinnan lähellä saadaan kaavasta $E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$, jossa σ on pinnan varauskate (varaus pinta-alayksikköä kohti) ja ε_0 on tyhjiön (ilman) permittiivisyys. Tasaisesti varatun tasopinnan varauskate määritetään oheisen kuvion mukaisesti keveään eristelankaan ripustetun varatun pallon avulla. Pallon massa on 0,18 g ja varaus 0,85 nC. Tasapainotilanteessa lanka muodostaa 33°:n kulman pystysuoran pinnan kanssa. Kuinka suuri on pinnan varauskate? [K2002, 7]



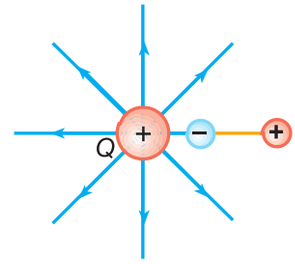
2-43. Sähködipolin muodostaa kaksi yhtä suurta vastakkaismerkkistä varausta, jotka ovat vakioetäisyydellä toisistaan. Kuvassa 1 dipolin kummankin varauksen kohdalla sähkökentän voimakkuus on sama, ja kuvissa 2 ja 3 dipoli on pistevarauksen Q pallosymmetrisessä kentässä. Perustele, missä tapauksessa dipoliin vaikuttaa
– ainoastaan kokonaisvoima
– ainoastaan vääntömomentti
– sekä kokonaisvoima että momentti.



1)



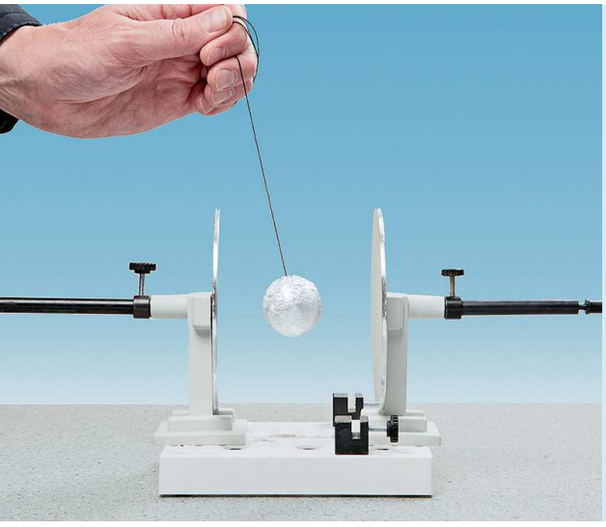
2)



3)

2.4 Homogeeninen sähkökenttä

Potentiaali ja jännite

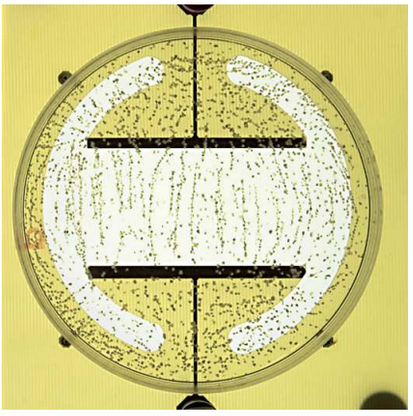


Oppilastyö ▪ Homogeeninen sähkökenttä

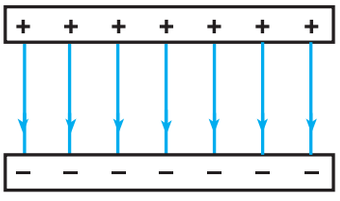
1. Pane mannasuurimoita risiiniöljyyn, joka on laakeassa muoviastiassa, ja yhdistä nauhageneraattoriin risiiniöljyssä olevat suorat ja yhdensuuntaiset elektrodit. Miten mannasuurimot asettuvat elektrodien välissä, kun varaat nauhageneraattoria?

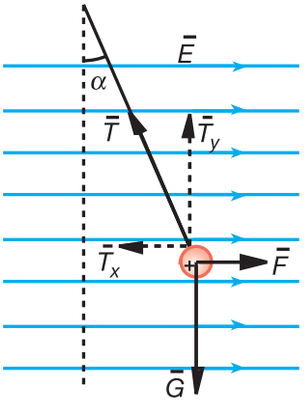
2. Varaa nauhageneraattorilla erimerkkisesti kaksi yhdensuuntaista, suurta metallilevyä. Liikuta hitaasti tasaisella nopeudella lankaan ripustettua varattua metallipalloa levyjen välissä. Tarkkaile ripustuslangan ja pystysuoran välistä kulmaa, kun pallo on sähkökentän eri kohdissa.

Sähkökenttä on **homogeeninen**, jos sähkökentän voimakkuus (myös suunta) sen jokaisessa pisteessä on sama. Jos kahden toisiaan lähellä olevan yhdensuuntaisen metallilevyn varaukset ovat itseisarvoltaan yhtä suuret mutta vastakkaismerkkiset, sähkökenttä levyjen välissä on lähes homogeeninen. Levyjen ulkopuolella kentän voimakkuus heikkenee. Oppilastyön kohdassa 1 mannasuurimojonot elektrodien välissä kuvaavat homogeenisen kentän kenttäviivoja.



Homogeeninen sähkökenttä.





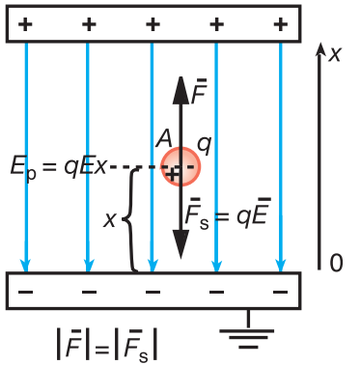
Kun oppilastyön kohdassa 2 varattu pallo asetetaan kahden varatun yhdensuuntaisen metallilevyn väliin, palloon kohdistuvat voimat ovat sähköinen voima $\bar{F}$, paino $\bar{G}$ ja langan tukivoima $\bar{T}$. Kun palloa liikutetaan hitaasti levyjen välissä, ripustuslangan kaltevuuskulma pysyy likimain vakiona.

Palloon kohdistuva sähköinen voima pysyy myös vakiona. Näin ollen homogeenisen sähkökentän voimakkuus metallilevyjen välissä on yhtälön $\overline{E} = \frac{\overline{F}}{q}$ perusteella vakio.

Homogeeninen sähkökenttä
Sähkökenttä on homogeeninen, jos sähkökentän voimakkuus sen jokaisessa pisteessä on sama. Homogeenisessa sähkökentässä sähkökentän voimakkuus on vakio.

Potentiaalienergia

Varatulla hiukkasella on sähkökentässä potentiaalienergiaa, aivan samoin kuin massallisella kappaleella on potentiaalienergiaa gravitaatiokentässä (ks. F4, s. 102). Potentiaalienergian suuruus riippuu hiukkasen paikasta kentässä. Kuten gravitaationkin tapauksessa, potentiaalienergian nollataso voidaan valita vapaasti. Usein nollatasoksi valitaan se kohta, jossa kenttä kohtaa maadoitetun kappaleen.



Piirroksessa on kaksi vastakkaisesti varattua levyä, joiden välissä on homogeeninen sähkökenttä. Negatiivisesti varattu levy on maadoitettu, joten sillä kohdalla olevan varatun hiukkasen potentiaalienergia valitaan nollaksi. Tarkastellaan positiivisesti varattua hiukkasta, joka siirretään negatiivisesti varatulta levyltä pisteeseen A, jonka etäisyys levystä on x. Hiukkaseen vaikuttaa negatiivista levyä kohti suuntautuva sähköinen voima $\overline{F}_s = q\overline{E}$, joten hiukkasen siirtämiseen tarvitaan yhtä suuri vastakkaissuuntainen voima $\overline{F}$. Koska sähkökenttä on homogeeninen, voimat ovat vakiovoimia. Siirtävä voima ja hiukkasen siirtymä ovat samansuuntaisia, joten voiman $\overline{F}$ tekemä työ on $W = Fx$. Hiukkasen sähköinen potentiaalienergia kasvaa siirrossa työn W suuruisella määrällä. Koska hiukkanen on aluksi potentiaalienergian nollatasolla, sen potentiaalienergia pisteessä A on $E_{pA} = W = Fx = F_s x = qEx$.

Hiukkasen potentiaalienergia homogeenisessa sähkökentässä
Varatun hiukkasen potentiaalienergia homogeenisen sähkökentän pisteessä A on

$$E_{pA} = qEx,$$

jossa q on hiukkasen varaus, E sähkökentän voimakkuuden suuruus ja x pisteen A etäisyys nollatasosta.

Sähkökentän potentiaali V_A pisteessä A on kentässä olevan hiukkasen potentiaalienergian E_{pA} ja hiukkasen varauksen q suhde: $V_A = \frac{E_{pA}}{q}$. Homogeenisen sähkökentän potentiaali pisteessä A on $V = \frac{E_{pA}}{q} = \frac{qEx}{q} = Ex$. Potentiaalin yksikkö on

$$[V] = \left[\frac{E_p}{q}\right] = \frac{1\,\text{J}}{1\,\text{C}} = 1\,\text{V (voltti)}.$$

Huomaa, että painetussa tekstissä potentiaalin suuresymboli V on kursivoitu ja sen yksikön, 1 voltin, symboli V on pystykirjain.

Homogeenisen sähkökentän potentiaali
Homogeenisen sähkökentän potentiaali kentän suuntaisella etäisyydellä x potentiaalin nollatasosta on

$$V = Ex,$$

jossa E on sähkökentän voimakkuus.

Homogeenisen sähkökentän kenttävoimakkuus on $E = \frac{V}{x}$, joten sen yksiköksi saadaan SI-järjestelmässä $[E] = \frac{[V]}{[x]} = \frac{1\,\text{V}}{1\,\text{m}} = 1\,\text{V/m}$. Vertaa $E = \frac{F}{q}$, $[E] = \frac{[F]}{[q]} = 1\,\text{N/C}$.

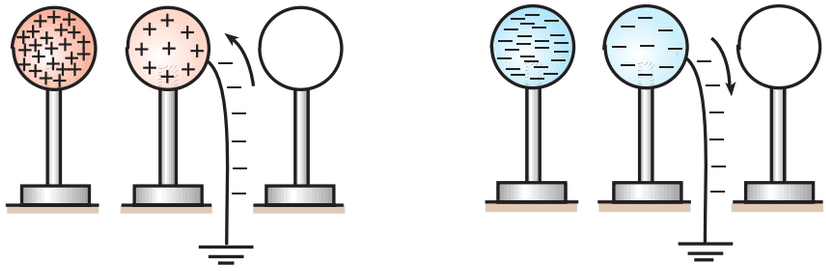
Sähkökentän potentiaali pienenee siirryttäessä sähkökentän suuntaan ja kasvaa siirryttäessä vastakkaiseen suuntaan. Sähkökentän suunta on siis ylemmästä potentiaalista alempaan potentiaaliin. Potentiaali ei muutu, kun siirrytään kohtisuorasti sähkökenttää vastaan.

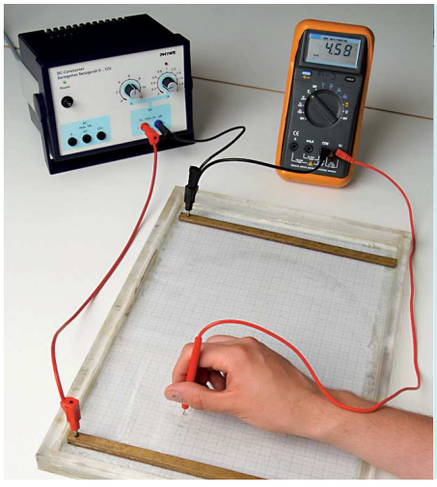
Potentiaali on sähkökenttään liittyvä suure. Kun sähkökentässä on varattu hiukkanen, sen potentiaalienergia on $E_p = qV$, jossa q on hiukkasen varaus ja V sähkökentän potentiaali hiukkasen kohdalla. Sähköinen potentiaalienergia tietyssä potentiaalissa riippuu siis hiukkasen varauksesta.

Kertaa virtapiirin potentiaali ja maadoitus, sivu 30.

Kun negatiivisesti varattu kappale kytketään metallijohtimella maahan, kappaleesta virtaa elektroneja maahan. Vastaavasti maasta virtaa elektroneja positiivisesti varattuun kappaleeseen. Lopulta saavutetaan tasapainotila, jolloin varausten liike lakkaa. Tällöin kappale on maan kanssa samassa potentiaalissa.

Maan ylimääräinen negatiivinen tai positiivinen varaus tasoittuu laajalle alueelle. Maata voidaan pitää niin suurena johdekappaleena, että sen varaustila ei muutu havaittavasti huolimatta elektronien siirtymisestä jompaankumpaan suuntaan. On luontevaa määritellä maan potentiaali **nollapotentiaaliksi**.



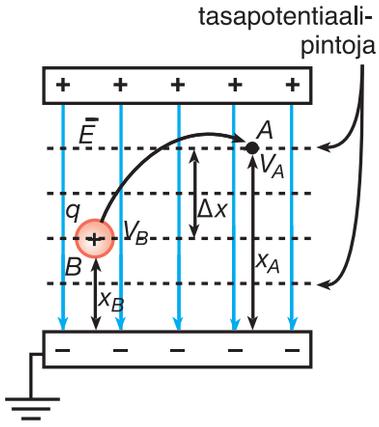


Oppilastyö ▪ Tasapotentiaalipinnat

Pane läpinäkyvän muovialtaan alle millimetripaperi mittaasteikoksi ja kaada altaaseen vettä. Maadoita jännitelähteen ja volttimittarin miinusnapa. Laita veteen altaan päihin kaksi yhdensuuntaista metallitankoa. Kytke tankoihin tasajännite. Tutki volttimittarin avulla potentiaalia eri pisteissä tankojen välissä. Mittaa potentiaali vähintään kolmesta eri kohdasta niin, että etäisyys miinusnapaan on sama. Toista mittaus jännitteen eri arvoilla ja eri etäisyyksillä miinusnavasta.

Yhdensuuntaisten metallitankojen välissä on homogeeninen sähkökenttä. Oppilastyössä havaitaan, että homogeenisessa sähkökentässä veden potentiaali pysyy mittaustarkkuuden rajoissa vakiona metallitankojen välissä niiden kanssa yhdensuuntaisilla janoilla. Niiden pisteiden, jotka ovat samassa potentiaalissa, sanotaan muodostavan **tasapotentiaalipinnan**. Pinta on kohtisuorassa sähkökentän kenttäviivoja vastaan. Homogeenisen sähkökentän tasapotentiaalipinnat ovat sähkökenttää vastaan kohtisuorassa olevia tasoja.

Jos varattu hiukkanen liikkuu tasapotentiaalipinnalla, sen potentiaalienergia ei muutu. Muissa liikesuunnissa potentiaalienergia joko pienenee tai suurenee.



Homogeenisessa sähkökentässä pisteiden *A* ja *B* välinen jännite on $U = E\Delta x$.

Kahden sähkökentän pisteen A ja B välistä **potentiaalieroa** $U_{AB} = V_A - V_B$ kutsutaan näiden pisteiden väliseksi **jännitteeksi**. Oppilastyössä havaitaan, että homogeenisessa sähkökentässä kahdella eri tasapotentiaalipinnalla olevien pisteiden välinen jännite on vakio riippumatta siitä, mitkä pisteet kyseisiltä pinnoilta valitaan. Jännitteen yhtälö saadaan muotoon

$$U_{AB} = V_A - V_B = Ex_A - Ex_B = E(x_A - x_B).$$

Jos pisteen A potentiaali on suurempi kuin pisteen B potentiaali, on $x_A - x_B > 0$. Jos merkitään $x_A - x_B = d$, jännite on $U = U_{AB} = Ed$.

Jännite homogeenisessa sähkökentässä

Sähkökentän potentiaalien erotusta pisteiden A ja B välillä kutsutaan näiden pisteiden väliseksi jännitteeksi.
Homogeenisessa sähkökentässä korkeammassa ja matalammassa potentiaalissa olevien pisteiden välinen jännite on

$$U = Ed,$$

jossa E on sähkökentän voimakkuus ja d pisteitä vastaavien tasapotentiaalipintojen välimatka.

Jos tasapotentiaalipintoja esittävässä piirroksessa pisteeseen A siirretty positiivisesti varattu hiukkanen päästetään vapaaksi, se siirtyy sähköisen voiman vaikutuksesta negatiivisesti varattua levyä kohti. Kun hiukkanen saavuttaa pistettä B vastaavan tasapotentiaalipinnan, on sähköinen voima tehnyt työn $W = F\Delta x = qE\Delta x = qU_{AB}$, jossa U_{AB} on alku- ja loppupisteen välinen jännite.

Sähköisen voiman tekemän työn yhtälö $W = qU_{AB}$ pätee yleisesti – myös epähomogeenisessa kentässä.

Sähköisen voiman tekemä työ

Kun varattu hiukkanen liikkuu sähkökentässä, siihen vaikuttava sähköinen voima tekee työn

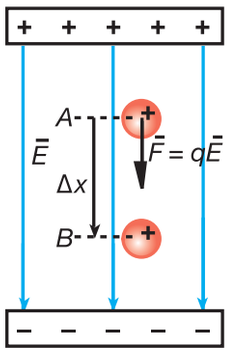
$$W = qU,$$

jossa q on hiukkasen sähkövaraus ja U hiukkasen radan alku- ja loppupisteen välinen jännite.

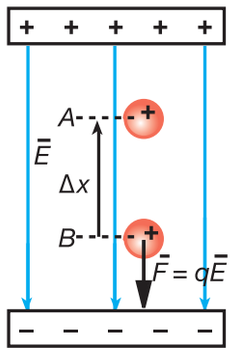
Kun varattu hiukkanen siirtyy sähkökentässä pisteestä A pisteeseen B, sen potentiaalienergian muutos on

$$\Delta E_\mathrm{p} = E_{\mathrm{p}B} - E_{\mathrm{p}A} = qV_B - qV_A = q(V_B - V_A) = -qU_{AB} = -W.$$

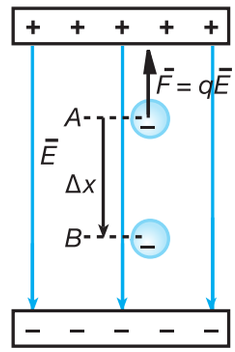
Potentiaalienergia siis muuttuu $-W$:n verran. Kun positiivisesti varattu hiukkanen siirtyy korkeammasta potentiaalista matalampaan, sähköinen voima tekee positiivisen työn ja hiukkasen potentiaalienergia pienenee vastaavalla määrällä. Vastaavasti negatiivisesti varatun hiukkasen potentiaalienergia pienenee, kun se liikkuu sähkökenttää vastaan. Työn vaikutuksesta potentiaalienergia muuttuu liike-energiaksi.



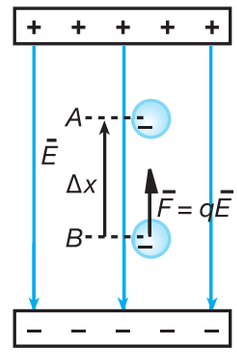
$W > 0$, koska siirtymä ja sähköinen voima ovat samansuuntaiset.



$W < 0$, koska siirtymä ja sähköinen voima ovat vastakkaissuuntaiset.

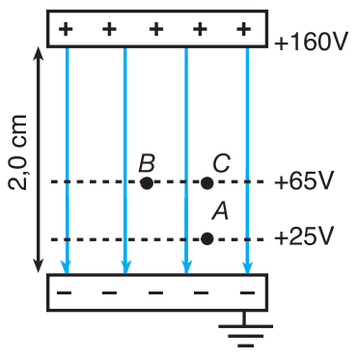


$W < 0$, koska siirtymä ja sähköinen voima ovat vastakkaissuuntaiset.



$W > 0$, koska siirtymä ja sähköinen voima ovat samansuuntaiset.

Esimerkki 6



Kahden tyhjiössä olevan yhdensuuntaisen metallilevyn välillä on homogeeninen sähkökenttä. Toisen levyn potentiaali on +160 V, ja toinen levy on maadoitettu. Kentän potentiaalit pisteissä A, B ja C ovat +25 V, +65 V ja +65 V. Levyjen välimatka on 2,0 cm.

a) Laske metallilevyjen välissä olevan sähkökentän voimakkuus.

b) Laske kentän pisteiden B ja A välinen jännite.

c) Laske sähköisen voiman tekemä työ, kun hiukkanen siirtyy pisteestä A pisteeseen C. Miksi vastaava työ on nolla, kun hiukkanen siirtyy edelleen pisteestä C pisteeseen B? Hiukkasen varaus on 2,5 nC.

d) Laske sähköisen voiman tekemä työ, kun hiukkanen siirtyy pisteestä A pisteeseen C. Hiukkasen varaus on −7,5 nC.

$U = 160$ V, $V_A = 25$ V, $V_B = 65$ V, $V_C = 65$ V,
$q_1 = 2{,}5$ nC, $q_2 = -7{,}5$ nC, $d = 0{,}020$ m

a) Homogeenisen sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan

$$E = \frac{U}{d} = \frac{160\text{ V}}{0{,}020\text{ m}} = 8{,}0\text{ kV/m}.$$

Sähkökentän voimakkuus on 8,0 kV/m, ja sen suunta on positiivisesta levystä negatiiviseen levyyn.

b) Jännite on kentän pisteiden B ja A välinen potentiaaliero:

$$U_{BA} = V_B - V_A = 65\text{ V} - 25\text{ V} = 40\text{ V}.$$

Pisteiden B ja A välinen jännite on 40 V.

c) Kun sähköinen voima siirtää varauksen $q_1 = 2{,}5$ nC pisteestä A pisteeseen C, varaukseen kohdistuva voima ja siirtymä ovat vastakkaissuuntaisia, joten työ on negatiivinen. Työ on

$$\begin{aligned} W &= q_1 U_{AC} = q_1(V_A - V_C) = 2{,}5 \cdot 10^{-9}\text{ C} \cdot (25\text{ V} - 65\text{ V}) \\ &= 2{,}5 \cdot 10^{-9}\text{ C} \cdot (-40\text{ V}) = -0{,}10\ \mu\text{J}. \end{aligned}$$

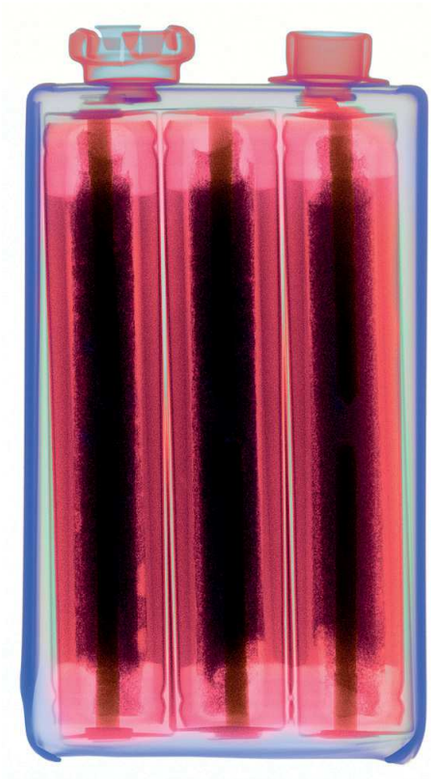
Työ on $-0{,}10$ µJ.

Pisteet C ja B ovat samalla tasapotentiaalipinnalla, joten jännite $U_{CB} = 0$ V. Varauksen siirtyessä pisteestä C pisteeseen B sähköinen voima ei tee työtä.

d) Kun hiukkanen, jonka varaus on $q_2 = -7{,}5$ nC, siirtyy pisteestä A pisteeseen C, varaukseen kohdistuva voima ja hiukkasen siirtymä ovat samansuuntaisia, joten työ on positiivinen. Työ on

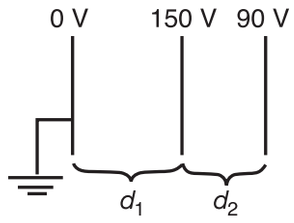
$$\begin{aligned} W &= q_2 U_{AC} = -7{,}5 \cdot 10^{-9}\text{ C} \cdot (25\text{ V} - 65\text{ V}) \\ &= -7{,}5 \cdot 10^{-9}\text{ C} \cdot (-40\text{ V}) = 0{,}30\ \mu\text{J}. \end{aligned}$$

Sähköinen voima tekee 0,30 µJ:n suuruisen työn.



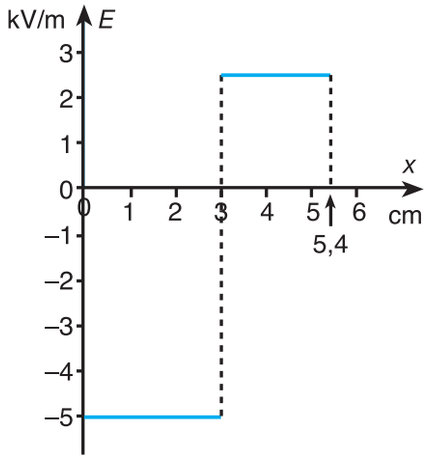
Röntgenkuva 9 V:n paristosta. Pariston napojen välinen jännite tarkoittaa napojen sähköisten potentiaalien erotusta. Positiivinen napa on korkeammassa potentiaalissa.

Esimerkki 7



Kolmen tyhjiössä olevan yhdensuuntaisen metallilevyn potentiaalit vasemmalta oikealle ovat 0 V, 150 V ja 90 V sekä välimatkat vastaavasti 3,0 cm ja 2,4 cm.
a) Esitä graafisesti sähkökentän voimakkuuden suuruus etäisyyden funktiona.
b) Esitä graafisesti potentiaali levyjen välillä.
c) Piirrä kenttäviivat levyjen väliin.

$V_1 = 0$ V, $V_2 = 150$ V, $V_3 = 90$ V, $d_1 = 3{,}0$ cm, $d_2 = 2{,}4$ cm

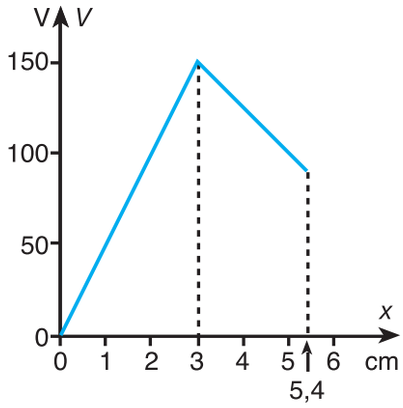


a) Koska metallilevyt ovat yhdensuuntaiset, levyjen väliset sähkökentät ovat homogeenisia. Sähkökentän voimakkuudet ovat

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{V_2 - V_1}{d_1} = \frac{150\text{ V} - 0\text{ V}}{0{,}030\text{ m}} = 5{,}0\text{ kV/m ja}$$

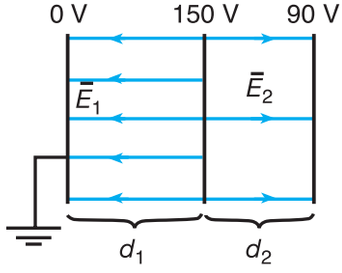
$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{V_2 - V_3}{d_2} = \frac{150\text{ V} - 90\text{ V}}{0{,}024\text{ m}} = 2{,}5\text{ kV/m.}$$

Sähkökentän suunta on ylemmästä potentiaalista alempaan. Kuvaajan piirtämistä varten valitaan suunta oikealle positiiviseksi. Asetetaan potentiaalissa 0 V oleva levy kohtaan $x = 0{,}0$ cm. Sähkökentän voimakkuuden suuruudet ja suunnat ovat $E_1 = -5{,}0$ kV/m (suunta vasemmalle) sekä $E_2 = 2{,}5$ kV/m (suunta oikealle).



b) Homogeenisessa sähkökentässä välillä 0,0 cm … 3,0 cm potentiaali $V = Ex$ on suoraan verrannollinen maadoitetusta levystä mitattuun etäisyyteen. Asetetaan potentiaalissa 0 V oleva levy kohtaan $x = 0{,}0$ cm. Etäisyydellä 3,0 cm potentiaali on +150 V. Välillä 3,0 cm … 5,4 cm kenttä on edelleen homogeeninen, joten potentiaali pienenee lineaarisesti 150 V:sta 90 V:iin.

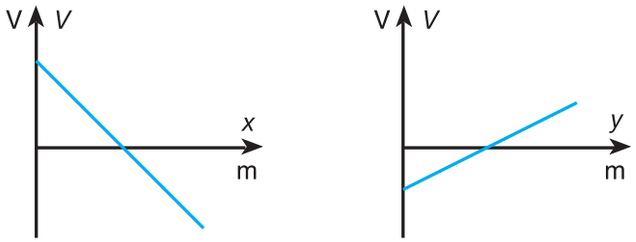
Huomaa, että kuvaajat (x, V)-koordinaatistossa ovat suoria. Kuvaajien fysikaalisista kulmakertoimista saadaan sähkökentän voimakkuuden suuruudet E.



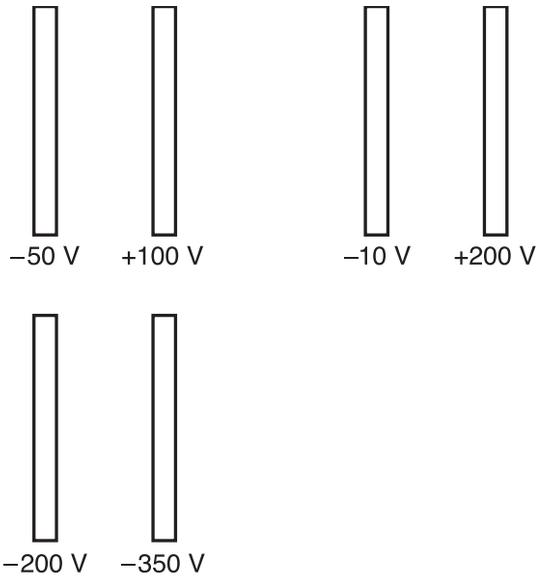
c) Sähkökentän voimakkuudet ovat vakioita levyjen välissä. Välillä 0,0 cm … 3,0 cm kentän voimakkuus on 5,0 kV/m vasemmalle ja välillä 3,0 cm … 5,4 cm 2,5 kV/m oikealle. Kuvassa sähkökentän voimakkuuksien ero ilmenee kenttäviivojen erilaisena tiheytenä.

Pohdi ja etsi

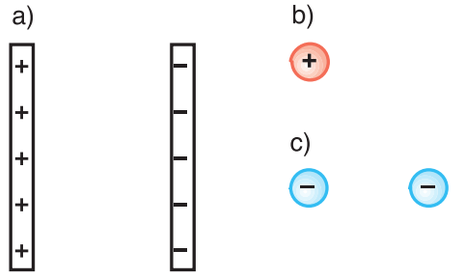
2-44. Elektroni on sähkökentässä, jossa sähköinen potentiaali riippuu paikasta x- ja y-suunnissa oheisten kuvaajien mukaisesti.
a) Millainen sähkökenttä on kyseessä?
b) Minkä suuntainen sähköinen voima elektroniin kohdistuu tässä kentässä?



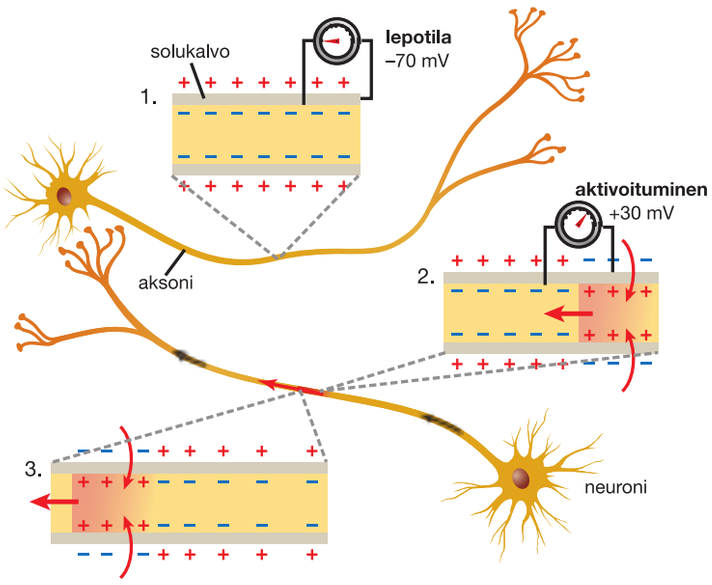
2-45. Kussakin kuvassa on kaksi yhdensuuntaista johdelevyä tyhjiössä samalla etäisyydellä toisistaan.
a) Minkä levyjen välissä oleva sähkökentän voimakkuus on suurin?
b) Päättele sähkökentän kenttäviivojen suunta kussakin tapauksessa.
c) Positroni on elektronin antihiukkanen, eli sillä on sama massa kuin elektronilla mutta vastakkaismerkkinen varaus. Jos positroni päästetään levosta liikkeelle alimman levyparin keskeltä, millaista sen liike on?



2-46. Piirrä kuviin sähkökentän kenttäviivat sekä tasapotentiaalipintoja. Kiinnitä erityistä huomiota viivojen suuntiin.
a) homogeeninen kenttä levyjen välissä
b) positiivisen pistevarauksen kenttä
c) kahden negatiivisen pistevarauksen kokonaiskenttä



2-47. Kuva esittää hermoimpulssin syntyä. Hermoimpulssi syntyy, kun solukalvon ulko- ja sisäpuolen välinen jännite muuttuu.
a) Mistä johtuu lepotilassa olevan hermosolun sisä- ja ulkopuolen välinen negatiivinen jännite (−70 mV)?
b) Miksi solukalvon jännite muuttuu positiiviseksi (+30 mV) alueen aktivoituessa?
c) Miten tämä paikallinen tapahtuma etenee hermostossa?
d) Mistä hermosolu saa energiaa tähän toimintaan?



Tehtäviä

2-48. Homogeenisessa sähkökentässä levyn A potentiaali on +300 V, levyn B potentiaali +100 V ja levyn C potentiaali −100 V.
a) Laske levyjen A ja B välinen jännite.
b) Laske levyjen A ja C välinen jännite.
c) Laske levyjen A ja B välisen sähkökentän voimakkuus, kun levyjen välimatka on 0,10 m.
d) Laske B-levyllä olevan elektronin potentiaalienergia A-levyn suhteen.

2-49. Laske pisteiden *A* ja *B* välinen jännite, kun homogeenisen sähkökentän voimakkuus on 45 kV/m ja pisteiden välinen etäisyys on 2,5 mm.

2-50. Homogeenisessa sähkökentässä on kaksi yhdensuuntaista johdelevyä, joiden välinen jännite on 230 V. Levyjen välinen etäisyys on 13,7 mm.
a) Laske sähkökentän voimakkuus.
b) Kuinka suuren työn sähköinen voima tekee, kun se siirtää hiukkasen, jonka varaus on 3,3 mC, levyltä toiselle ylemmästä potentiaalista alempaan potentiaaliin?

2-51. a) Pisteestä *A* lähtevä kappale, jonka varaus on 31 mC, liikkuu homogeenisen sähkökentän kenttäviivojen suunnassa pisteeseen *B*. Tällöin kappaleeseen kohdistuva sähköinen voima tekee 4,2 J:n työn. Laske pisteiden *A* ja *B* välinen jännite.
b) Laske sähköisen voiman tekemä työ, kun Mg^{2+}-ioni siirtyy potentiaalista −120 V potentiaaliin +95 V.

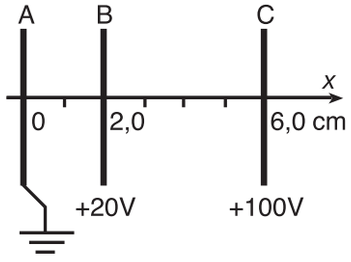
2-52. Homogeenisen sähkökentän voimakkuus on 0,55 kV/m. Kentässä on hiukkanen, jonka varaus on +6,5 nC. Sähköinen voima siirtää hiukkasen 4,5 cm:n etäisyydeltä potentiaalin nollatasolle.
a) Laske sähköisen voiman tekemä työ.
b) Laske kentän potentiaali lähtöpisteessä.

2-53. a) Pistemäinen varattu pallo, jonka massa on 17 μg, pysyy paikallaan homogeenisessa sähkökentässä. Levyjen välinen jännite on 230 V ja etäisyys 1,0 m. Sähkökentän suunta on ylöspäin. Laske pallon varaus.
b) Varattu pistemäinen hiukkanen on paikallaan homogeenisessa sähkökentässä, joka suuntautuu ylhäältä alaspäin. Hiukkasen massa on 4,5 fg ja varaus −24 aC. Laske levyjen välinen jännite, kun niiden välinen etäisyys on 6,6 cm.

2-54. Homogeenisessa sähkökentässä olevan pallon varaus on 16 μC ja massa 5,0 g. Pallon ripustuslanka muodostaa luotiviivan kanssa 15°:n kulman.
a) Kuinka suuri sähköinen voima kohdistuu palloon?
b) Laske sähkökentän voimakkuus.

2-55. Ohuessa silkkilangassa riippuu varattu pallo, jonka massa on 13 mg. Pallo on vaakasuorassa homogeenisessa sähkökentässä, jonka voimakkuus on 4,0 kV/cm. Silkkilanka poikkeaa pystysuorasta suunnasta 2,5°. Laske pallon varaus.

2-56. Esitä graafisesti kuvan tilanteessa sähkökentän voimakkuus (*x*, *E*)-koordinaatistossa ja potentiaali (*x*, *V*)-koordinaatistossa. Levyt ovat ohuet.



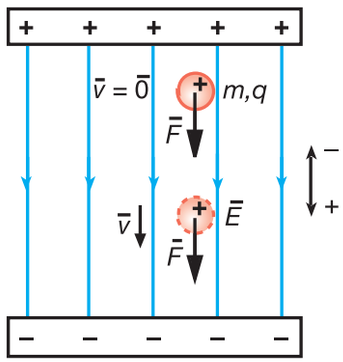
Varattu hiukkanen homogeenisessa sähkökentässä

Sähkökentässä olevaan varattuun hiukkaseen kohdistuu sähköinen voima $\overline{F} = q\overline{E}$, jossa q on hiukkasen sähkövaraus ja $\overline{E}$ sähkökentän voimakkuus. Homogeenisessa kentässä sähköinen voima on vakio, jolloin myös hiukkasen kiihtyvyys on vakio. Jos varattu hiukkanen tulee homogeeniseen sähkökenttään **pitkittäisesti** eli kenttäviivojen suuntaisesti tai niitä vastaan, hiukkanen joutuu tasaisesti kiihtyvään suoraviivaiseen liikkeeseen.

Newtonin II lain mukaisesti sähköinen vakiovoima antaa hiukkaselle, jonka massa on m ja varaus q, kiihtyvyyden $\overline{a} = \dfrac{\overline{F}}{m} = \dfrac{q\overline{E}}{m}$.

Varatun hiukkasen kiihtyvyys homogeenisessa sähkökentässä
Sähköinen vakiovoima antaa hiukkaselle, jonka massa on m ja varaus q, voiman suuntaisen kiihtyvyyden $\overline{a}$, jonka suuruus on $a = \dfrac{qE}{m}$.

Esimerkki 8



Protoni lähtee levosta ja liikkuu homogeenisen sähkökentän kenttäviivojen suuntaan kuvan mukaisesti. Sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan 1,9 kV/m. Laske protonin
a) nopeus sekunnin miljoonasosan kuluttua lähdöstä
b) sekunnin miljoonasosassa kulkema matka.

$E = 1{,}9\ \text{kV/m}, \quad q = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C},$
$m = 1{,}6726231 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}, \quad t = 1{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{s}, \quad v_0 = 0\ \text{m/s}$

a) Protoni liikkuu homogeenisessa sähkökentässä kenttäviivojen suuntaan tasaisesti kiihtyen, koska siihen vaikuttaa sähkökentän kenttäviivojen suuntainen sähköinen vakiovoima. Newtonin II lain mukaan sähköinen voima antaa protonille kiihtyvyyden $\overline{a} = \dfrac{\overline{F}}{m} = \dfrac{q\overline{E}}{m}$.

Koska protoni lähtee levosta, protonin nopeudeksi saadaan

$$v = at = \frac{qE}{m}t$$

$$= \frac{1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1{,}9 \cdot 10^{3}\ \text{V/m}}{1{,}6726231 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}} \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{s}$$

$$\approx 0{,}18\ \text{Mm/s}.$$

Protonin nopeus on 0,18 Mm/s.

b) Protonin kulkema matka on

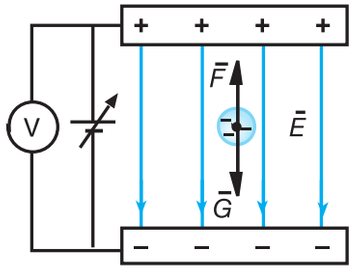
$$s = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}\frac{qE}{m}t^2$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1{,}9 \cdot 10^{3}\ \text{V/m}}{1{,}6726231\ \cdot 10^{-27}\ \text{kg}} \cdot (1{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{s})^2$$

$$\approx 0{,}091\ \text{m}.$$

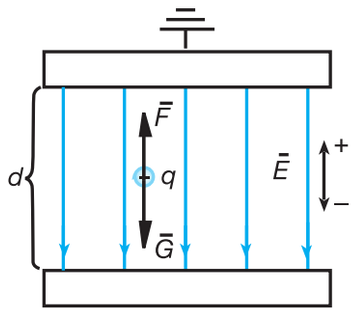
Protonin kulkema matka on 9,1 cm.

Yhdysvaltalainen *Robert A. Millikan* (1868–1953) tutki pienien varattujen öljypisaroiden liikettä homogeenisessa sähkökentässä. Sähkökentän voimakkuus voitiin säätää niin, että tietty pisara leijui levossa tai oli tasaisessa liikkeessä. Tällöin pisaraan kohdistuva sähköinen voima $\vec{F}$ ja paino $\vec{G}$ olivat yhtä suuria eli $F = qE = G$. Pisaran sähkövaraus oli suuruudeltaan $q = \frac{G}{E}$. (Ks. esimerkki 9.)



Millikan toisti kokeen noin 2000 kertaa. Hän huomasi, että pisaran sähkövaraus on aina pienen varauksen monikerta. Tämä varaus on alkeisvaraus e, joten varaus on aina alkeisvarauksen monikerta eli $q = ne$, jossa n on kokonaisluku. Millikan osoitti siis alkeisvarauksen olemassaolon ja määritti sen suuruuden. Varaus todettiin ensimmäiseksi suureeksi, jonka arvo on **kvantittunut**. Millikanin koe on tieteen historian merkittävimpiä kokeita. Millikan sai työstään fysiikan Nobelin palkinnon vuonna 1923.

Esimerkki 9



Pienen öljypisaran liikettä metallilevyjen välissä seurattiin mikroskoopilla. Yhdensuuntaisten, vaakasuorien levyjen välimatka oli 20,0 mm ja pisaran massa 26 pg. Kun ylempi levy oli maadoitettu ja alemman levyn potentiaali säädettiin arvoon −8,1 kV, pisara pysyi pitkään vakiokorkeudella. Määritä pisaran varaus.

$d = 20{,}0\ \text{mm}, \quad m = 26\ \text{pg}, \quad V = -8{,}1\ \text{kV},$
$e = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$

Levyjen välillä on homogeeninen sähkökenttä, jonka suunta on kuvassa alas. Pisaraan kohdistuvat voimat ovat paino $\overline{G} = m\overline{g}$ ja sähköinen voima $\overline{F} = q\overline{E}$. Koska pisara pysyy paikallaan ja $\overline{G}$ osoittaa alas, pisaraan kohdistuvan sähköisen voiman $\overline{F}$ on osoitettava ylös. Siksi pisaran varauksen on oltava negatiivinen.

Koska pisara pysyi vakiokorkeudella, siihen kohdistuvien voimien summa on Newtonin II lain mukaan nolla eli $\sum \overline{F} = \overline{0}$. Sovitaan suunta ylös positiiviseksi, jolloin saadaan skalaariyhtälö $F - G = 0$ eli $|q|E - mg = 0$. Varauksen suuruus on $|q| = \dfrac{mg}{E}$.

Homogeenisen sähkökentän voimakkuuden suuruus $E = U/d$. Koska ylempi levy on maadoitettu, sen potentiaali on 0 V. Levyjen välinen jännite on $U = 0\ \text{V} - (-8{,}1\ \text{kV}) = 8{,}1\ \text{kV}$.

Pisaran varauksen suuruus on

$$|q| = \frac{mg}{E} = \frac{mgd}{U} = \frac{26 \cdot 10^{-15}\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2 \cdot 20{,}0 \cdot 10^{-3}\ \text{m}}{8100\ \text{V}}$$

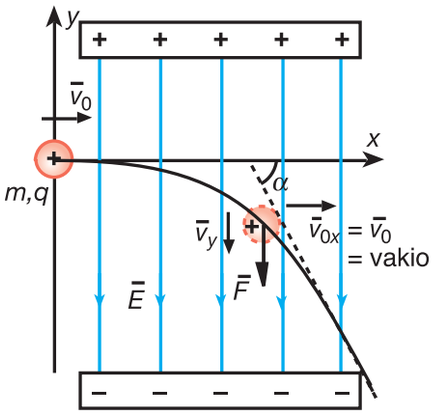
$$\approx 6{,}297778 \cdot 10^{-19}\ \text{C}.$$

Pisaran varauksen suuruuden suhde alkeisvaraukseen e on

$$\frac{|q|}{e} = \frac{6{,}297778 \cdot 10^{-19}\ \text{C}}{1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C}} \approx 3{,}930762,$$

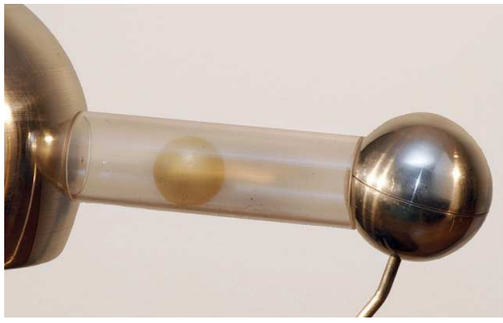
joten $|q| \approx 3{,}930762\ e$.

Pisaran varauksen on oltava alkeisvarauksen monikerta, joten $|q| \approx 4\ e$. Pisaran varaus on $q = -4\ e$.



Jos varattu hiukkanen tulee homogeeniseen sähkökenttään kohtisuorasti kenttäviivoja vastaan eli **poikittaisesti**, hiukkasen liikkeen radaksi tulee paraabelin kaari. Sähkökenttä vaikuttaa hiukkaseen koko ajan kentän suuntaisella vakiovoimalla, joten hiukkasen liikerata kaartuu sähkökentässä samalla tavalla kuin vaakasuoraan heitetyn kappaleen rata gravitaatiokentässä. Poikittainen sähkökenttä **muuttaa hiukkasen nopeuden suuntaa ja suuruutta**.

Mekaanisen energian säilymislaki sähkökentässä



Oppilastyö ▪ Potentiaali- ja liike-energia sähkökentässä
Pane nauhageneraattorin pallojen väliin vaakasuoraan läpinäkyvä muoviputki, jonka sisällä on metallipäällysteinen pöytätennispallo. Varaa generaattorin pallot pienellä varauksella. Tarkastele pallon liikettä. Varaa generaattori suurella varauksella ja tarkkaile taas pallon liikettä.

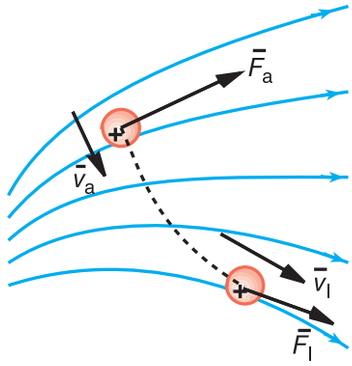
Sähkökentässä olevan hiukkasen potentiaalienergia on sähköiseen vuorovaikutukseen liittyvää energiaa. Liike-energia on liikkuvan hiukkasen mekaanista energiaa. Hiukkasen liikettä sähkökentässä tarkastellaan yleensä niin, että hiukkanen liikkuu tyhjiössä eikä hiukkaseen kohdistuvaa painoa oteta huomioon. Tällöin varattuun hiukkaseen vaikuttava kokonaisvoima on **sähköisen vuorovaikutuksen aiheuttama voima**. **Työperiaatteen** mukaan hiukkasen liike-energian muutos on yhtä suuri kuin kokonaisvoiman tekemä työ eli $\Delta E_k = W$.

Työperiaate homogeenisessa sähkökentässä
Hiukkasen liike-energian muutos on yhtä suuri kuin kokonaisvoiman tekemä työ: $\Delta E_k = W$ eli

$$\frac{1}{2}mv_l^2 - \frac{1}{2}mv_a^2 = qU = qE\Delta x,$$

jossa v_a on varatun hiukkasen nopeus alussa, v_l nopeus lopussa ja Δx hiukkasen siirtymä.

Oppilastyössä pöytätennispallo saa nauhageneraattorin isolta pallolta sähkövarauksen, jolloin molemmilla on samanmerkkinen varaus. Nauhageneraattorin ison pallon ja pienen pallon välillä on sähkökenttä. Sähköinen voima vaikuttaa pöytätennispalloon ja saa sen kiihtyvään liikkeeseen. Voima tekee työtä, ja osa pöytätennispallon potentiaalienergiasta muuntuu liike-energiaksi. Lopulta putkessa liikkuva pallo törmää generaattorin pieneen palloon, jolle se luovuttaa varauksensa. Samalla pöytätennispallo pomppaa takaisin kohti suurta palloa. Liike jatkuu edestakaisena, kunnes suuren pallon varaus on purkautunut. Liikkeeseen vaikuttaa myös sähköinen influenssi, jota tarkastellaan myöhemmin luvussa 2.5.



Positiivisesti varatun hiukkasen liike sähkökentässä.

Sähkökentässä on varattu hiukkanen, jonka varaus on q. Tarkastellaan hiukkasta alku- ja lopputilanteessa (a ja l), kun sähköisen vuorovaikutuksen aiheuttama voima kiihdyttää sitä potentiaalista V_a potentiaaliin V_l. Tällöin sähköinen voima tekee työn, joka on työperiaatteen mukaan yhtä suuri kuin hiukkasen liike-energian muutos eli $\Delta E_k = E_{kl} - E_{ka}$. Samalla voima muuttaa kappaleen liikettä, jolloin hiukkasen potentiaalienergiaa muuntuu liike-energiaksi. Potentiaalienergian muutos on $\Delta E_p = E_{pa} - E_{pl} = qV_a - qV_l$.

Koska hiukkaseen kohdistuva sähköinen voima on konservatiivinen, potentiaalienergian ja liike-energian muutosten summa on nolla: $\Delta E_p + \Delta E_k = 0$ eli $E_{pl} - E_{pa} + E_{kl} - E_{ka} = 0$. Yhtälö saadaan muotoon

$$qV_l - qV_a + \frac{1}{2}mv_l^2 - \frac{1}{2}mv_a^2 = 0 \text{ eli}$$

$$qV_a + \frac{1}{2}mv_a^2 = qV_l + \frac{1}{2}mv_l^2,$$

joten $E_{pa} + E_{ka} = E_{pl} + E_{kl}$.

Mekaanisen energian säilymislaki sähkökentässä

Varatun hiukkasen mekaaninen energia säilyy sähkökentässä:

$$E_{pa} + E_{ka} = E_{pl} + E_{kl} \text{ eli } qV_a + \frac{1}{2}mv_a^2 = qV_l + \frac{1}{2}mv_l^2.$$

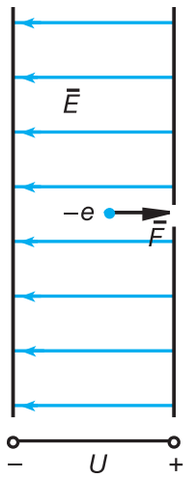
Huomaa, että yhtälöä käytettäessä ei tarvita tietoa sähkökentän muodosta tai voimakkuudesta eikä varaukseen kohdistuvasta voimasta, joka aiheuttaa hiukkasen liikkeen muutoksen.

Jos kiihdytettävä (tai jarrutettava) hiukkanen on elektroni tai protoni, sen varauksen itseisarvo on $|q| = e$. Jos elektronin tai protonin kiihdytysjännite on 1 V, se saa liike-energian $E_k = eU = 1\text{ e} \cdot 1\text{ V} = 1\text{ eV} = 1$ elektronivoltti.

$$1\text{ eV} = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\text{ C} \cdot 1\text{ V} = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\text{ J}.$$

Elektronivoltti on hiukkasfysiikassa usein käytetty energian yksikkö. Sitä ja sen kerrannaisia (keV, MeV, GeV) käytetään yleensä atomi-, ydin- ja hiukkasfysiikassa lepo-, liike- ja potentiaalienergian yksikköinä.

Esimerkki 10



Oskilloskoopissa käytettävä kiihdytysjännite on 720 V. Laske levosta lähtevien elektronien saama nopeus.

$U = 720\text{ V}, \quad q = |-e| = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\text{ C},$
$m = 9{,}1093897 \cdot 10^{-31}\text{ kg}, \quad v_a = 0{,}0\text{ m/s}$

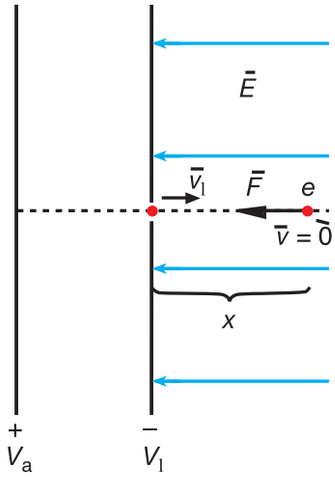
Työperiaatteen mukaan hiukkaseen vaikuttavan sähköisen voiman tekemä työ on yhtä suuri kuin hiukkasen liike-energian muutos eli $\frac{1}{2}mv_l^2 - \underbrace{\frac{1}{2}mv_a^2}_{=0} = qU$, josta $v_l^2 = \frac{2qU}{m}$ ja nopeus

$$v_l = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\text{ C} \cdot 720\text{ V}}{9{,}1093897 \cdot 10^{-31}\text{ kg}}} \approx 16\text{ Mm/s}.$$

Elektronin loppunopeus on 16 Mm/s.

Katodisädeputki. Anodilta irronneet elektronit kiihdytetään lähes tyhjiössä anodin ja katodin välisessä sähkökentässä. Elektronien loppunopeuden määrää kiihdytysjännite.

Esimerkki 11



Levosta lähtevä protoni kiihdytetään homogeenisessa sähkökentässä nollapotentiaalista −4,5 kV:n potentiaaliin.
a) Laske protonin nopeus kiihdytyksen jälkeen.
b) Kiihdytysvaiheen jälkeen protoni tulee vastakkaissuuntaiseen, jarruttavaan homogeeniseen kenttään. Jarruttavan kentän voimakkuus on 150 kV/m. Kuinka pitkälle protoni etenee jarruttavassa kentässä?

$V_a = 0\ \text{V}, \quad V_l = -4{,}5\ \text{kV}, \quad E = 150\ \text{kV/m}, \quad v_a = 0{,}0\ \text{m/s},$
$q = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C}, \quad m = 1{,}6726231 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$

a) Protoni kiihdytetään levosta ($v_a = 0{,}0$ m/s) potentiaalista $V_a = 0$ V potentiaaliin $V_l = -4{,}5$ kV. Koska protonin mekaaninen energia säilyy, yhtälö $qV_a + \frac{1}{2}mv_a^2 = qV_l + \frac{1}{2}mv_l^2$ saa muodon $qV_a - qV_l = \frac{1}{2}mv_l^2$ eli $q(V_a - V_l) = qU = \frac{1}{2}mv_l^2$. Yhtälöstä $qU = \frac{1}{2}mv_l^2$ protonin nopeus kiihdytysvaiheen jälkeen on

$$v_l = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 4{,}5 \cdot 10^{3}\ \text{V}}{1{,}6726231 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}}}$$
$$= 0{,}928491 \cdot 10^{6}\ \text{m/s} \approx 0{,}93 \cdot 10^{6}\ \text{m/s}.$$

Protonin nopeus on $0{,}93 \cdot 10^6$ m/s.

b) Kun protoni tulee jarruttavaan kenttään, sen nopeus on $v_l = 0{,}9285$ m/s. Jarruttavassa, homogeenisessa sähkökentässä sähköisen voiman tekemä työ on työperiaatteen mukaan yhtä suuri kuin protonin liike-energian muutos. Protoni etenee jarruttavassa kentässä matkan x. Tällöin protoni on ratansa etäisimmässä kohdassa x, jossa sen nopeus v ja liike-energia ovat nollia. Näin ollen yhtälö $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_l^2 = -Fx = -qEx$ saadaan muotoon $-\frac{1}{2}mv_l^2 = -qEx$, josta protonin jarruttavassa kentässä kulkema matka on

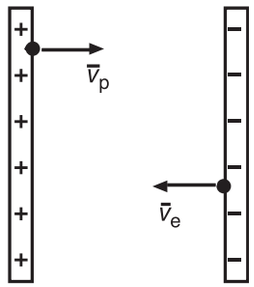
$$x = \frac{\frac{1}{2}mv_l^2}{qE} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 1{,}6726231 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot (0{,}928491 \cdot 10^{6}\ \text{m/s})^2}{1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 150 \cdot 10^{3}\ \text{V/m}}$$
$$\approx 0{,}030\ \text{m} = 3{,}0\ \text{cm}.$$

Protoni pysähtyy kuljettuaan jarruttavassa kentässä 3,0 cm.

Tehtäviä

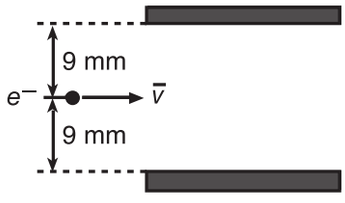
2-57. Laske elektronin kiihtyvyys sähkökentässä, jonka voimakkuus on 390 V/m. Vertaa kiihtyvyyttä putoamiskiihtyvyyteen.

2-58. Kahden yhdensuuntaisen kuparilevyn välinen etäisyys on 5,0 cm, ja niiden välinen jännite on 60 V. Positiiviselta levyltä irtoaa protoni samanaikaisesti, kun negatiiviselta levyltä irtoaa elektroni.
a) Laske hiukkasten kiihtyvyydet sähkökentässä.
b) Kuinka kauan aikaa on kulunut irtoamisesta, kun hiukkaset ohittavat toisensa?
c) Kuinka kaukana positiivisesti varatusta levystä protoni on ohitushetkellä?
Hiukkasten välistä sähköistä vetovoimaa ei oteta huomioon.



2-59. Öljypisara, jonka massa on 35 pg ja varaus $+22\ e$, pysyy paikallaan kahden vaakasuoran johdelevyn välissä. Kuinka suuri on levyjen välinen jännite, kun ne sijaitsevat 12 mm:n etäisyydellä toisistaan? Piirrä kuvio. [S2005, 7]

2-60. Kahden samanlaisen vaakasuoran metallilevyn välinen jännite on 580 V. Vaakasuora elektronisuihku osuu levyjen väliin kuvan mukaisesti. Elektronien nopeus on $26 \cdot 10^6$ m/s, ja levyjen väli on 18 mm. Kuinka pitkiä levyt voivat korkeintaan olla, jotta elektronisuihku ei osuisi kumpaankaan levyyn?



2-61. Protoni tulee kohtisuorasti kahden levyn väliseen homogeeniseen sähkökenttään nopeudella $1{,}2 \cdot 10^6$ m/s. Levyjen väli on 3,0 cm, ja sähkökentän leveys on 17,5 cm sekä voimakkuus 2,5 kN/C.
a) Laske protonin siirtymä kohtisuorassa suunnassa tulosuuntaa vastaan, kun protoni tulee ulos kentästä.
b) Laske kulma, jossa protoni poistuu kentästä.

2-62. 1,2 kV:n jännitteellä kiihdytetty elektronisuihku osuu kohtisuorasti oskilloskoopin poikkeutuslevyjen väliseen homogeeniseen sähkökenttään. Levyjen välimatka on 8,0 mm ja pituus 34 mm. Kuinka suuri on levyjen välinen jännite, kun sähkökentän jälkeen elektronisuihkun suunta poikkeaa 12° alkuperäisestä? [S1990, 5]

2-63. a) Ilmoita elektronin liike-energia 2,5 keV jouleina.
b) Elektronin liike-energia on $28 \cdot 10^{-18}$ J. Ilmoita energia elektronivoltteina.

2-64. Protoni lähtee levosta sähkökentän 0 V:n potentiaalista. Mikä on protonin nopeus ja liike-energia −150 V:n potentiaalissa?

2-65. Homogeenisen sähkökentän voimakkuus on 3,5 kV/m.
a) Laske sähköinen voima, joka kohdistuu kentässä olevaan elektroniin.
b) Kuinka suurella voimalla Maa vetää elektronia?
c) Laske elektronin potentiaalienergian muutos, kun elektronia siirretään 1,5 cm sähkökentän kenttäviivojen suunnassa. Ilmoita vastaus sekä jouleina että elektronivoltteina.

2-66. α-hiukkanen on ${}^4_2\mathrm{He}^{2+}$-ioni. Levossa olevaa α-hiukkasta kiihdytetään sähkökentän avulla. Lähtöpisteessä kentän potentiaali on +8,5 kV.
a) Laske kentän potentiaali pisteessä, jossa α-hiukkasen liike-energia on $4{,}8 \cdot 10^{-16}$ J.
b) Kuinka suuri potentiaalin muutos kyseisellä matkalla tapahtuu?

2-67. Elektronit kiihdytetään oskilloskoopin sähkökentässä −610 V:n potentiaalista nollapotentiaaliin. Laske levosta lähtevien elektronien saama nopeus.

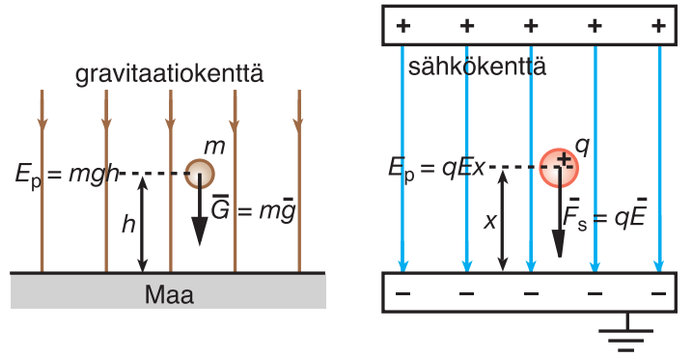
2-68. Elektronit liikkuvat katodisädeputkessa nopeudella 22 Mm/s. Niiden liikettä jarrutetaan 1,3 kV:n vastajännitteellä. Laske elektronien nopeus jarrutuksen jälkeen.

2-69. Varattu hiukkanen saapuu sähkökenttään nopeudella $1{,}6 \cdot 10^5$ m/s. Se liikkuu sähkökentässä kentän suuntaa vastaan kahden sellaisen pisteen välin, joiden potentiaaliero on −110 V. Laske hiukkasen loppunopeus, kun hiukkanen on a) protoni b) elektroni.

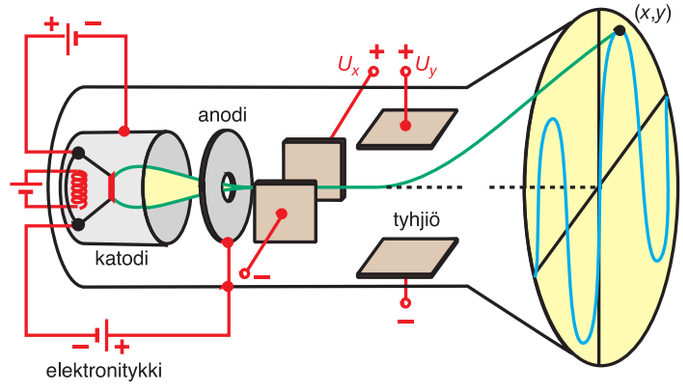
2-70. Ilmassa olevan 5,1 nC:n suuruisen pistevarauksen sähkökentässä on 0,30 m:n etäisyydellä varauksesta piste *A* ja 0,40 m:n etäisyydellä piste *B*.
a) Laske pisteiden *A* ja *B* potentiaalit.
b) Laske pisteiden *A* ja *B* välinen jännite.
c) Kuinka suuren työn sähköinen voima tekee, kun se siirtää 0,20 nC:n varauksen pisteestä *A* pisteeseen *B*? Pistevarauksen *Q* potentiaali on

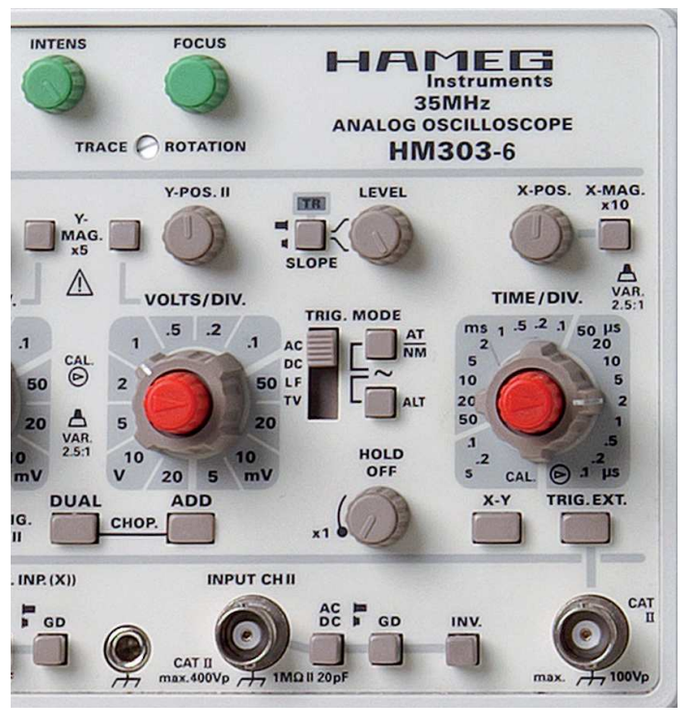
$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0}\frac{Q}{r}.$$

2-71. Gravitaatiovuorovaikutuksessa kappaleiden massat ovat vuorovaikutuksessa keskenään, ja sähköisessä vuorovaikutuksessa sähkövarakset ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Vertaa gravitaatio- ja sähköistä vuorovaikutusta.

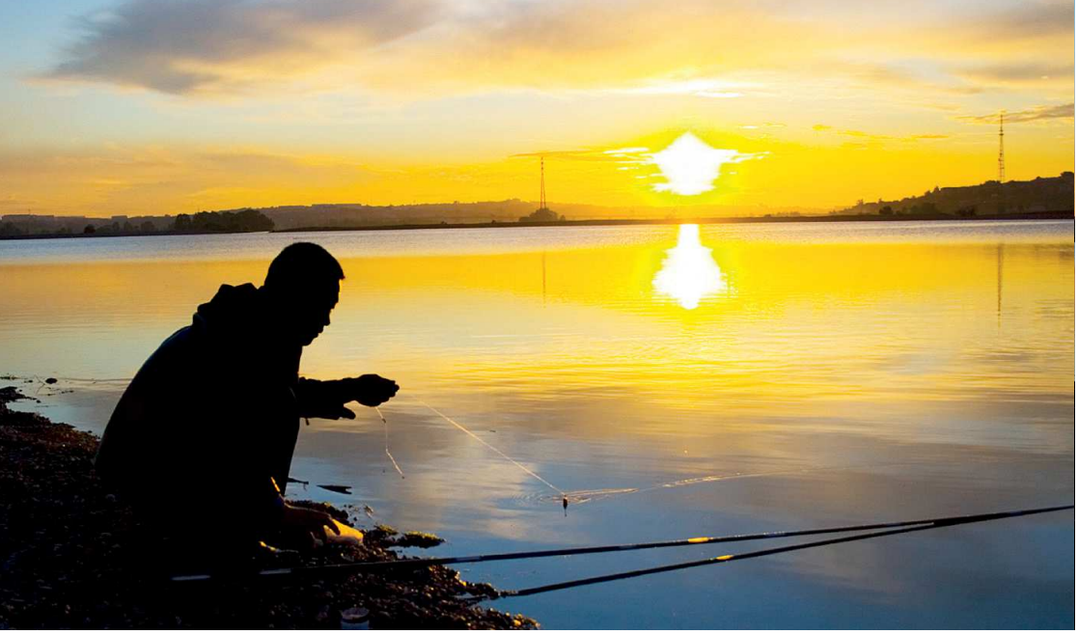


2-72. Selvitä oheisen oskilloskoopin rakennepiirroksen avulla oskilloskoopin toiminta.





Kiertokytkimistä Time/Div ja Volts/Div valitaan vaaka- ja pystyakselien yhtä ruutua vastaavat ajan ja jännitteen arvot.



Kesähelteillä vesistöjen yllä matalalla roikkuvat korkeajännitteiset sähkölinjat voivat aiheuttaa vaaratilanteita onkijoille ja purjehtijoille.

Miksi Valamon luostarikirkon kupolissa on kaapeleita?

2.5 Aine sähkökentässä

Aineet luokitellaan niiden sähkönjohtokyvyn mukaan **johteisiin, eristeisiin ja puolijohteisiin**. Aineiden sähkönjohtokyky riippuu ensisijaisesti elektroniverhon rakenteesta. Nimensä mukaisesti johteet johtavat sähköä hyvin ja eristeet eristävät sähköä hyvin. Puolijohteiden yhteydessä tarkastellaan johteiden, eristeiden ja puolijohteiden mikrorakennetta sähkönjohtavuuden kannalta (ks. s. 160).

Johde sähkökentässä

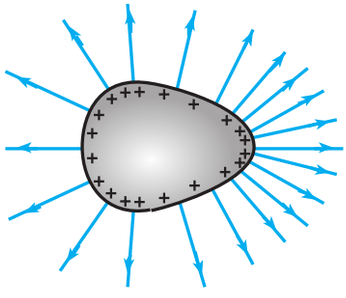
Johteissa vapaat, varatut hiukkaset toimivat varauksenkuljettajina. Tyypillisiä sähkönjohteita ovat metallit, kuten kupari ja alumiini, sekä hiili. Myös ioneja sisältävät nesteet eli elektrolyytit sekä ionisoituneet kaasut johtavat sähköä.

Oppilastyö ▪ Faradayn häkki

1. Pane risiiniöljyä, mannasuurimoita ja elektrodit muoviastiaan. Yhdistä elektrodit nauhageneraattoriin. Aseta elektrodien väliin metallirengas. Tutki, miten kenttäviivat kulkevat metallirenkaan ulko- ja sisäpuolella.

2. Ota metalliverkosta tehty lieriö ja kiinnitä sen sisä- ja ulkopinnalle ohuita alumiinifoliosta tai paperista leikattuja suikaleita. Kiinnitä lieriö nauhageneraattorin kuvun päälle. Varaa generaattori ja tarkkaile leikkaamiasi suikaleita.

Oppilastyössä sähkökentän kenttäviivoja kuvaavat mannasuurimot asettuvat metallirenkaan ulkopuolella ketjuiksi metallirenkaan ja elektrodien välille. Ketjut ovat kohtisuorassa pintoja vastaan, kuten sähkökentän kenttäviivat ovat aina kohtisuorassa johdekappaleen pintaa vastaan. Metallirenkaan sisällä mannasuurimot eivät järjesty ketjuiksi vaan säilyttävät alkuperäisen satunnaisen paikkansa. Metallirenkaan sisällä sähkökentän voimakkuus on nolla eli sähkökenttää ei ole. Myöskään metalliverkkolieriön sisällä ei ole sähkökenttää.



Varaustiheys riippuu johdekappaleen pinnan kaarevuudesta.

Pallon sähkövaraus jakautuu tasaisesti pallon pinnalle. **Varaustiheys** on suuri kappaleen ulospäin kaarevissa pinnoissa ja kärjissä. Myös sähkökentän voimakkuus on kärjen läheisyydessä suuri. Tästä voi seurata sähkövarausten purkautuminen ilmaan.

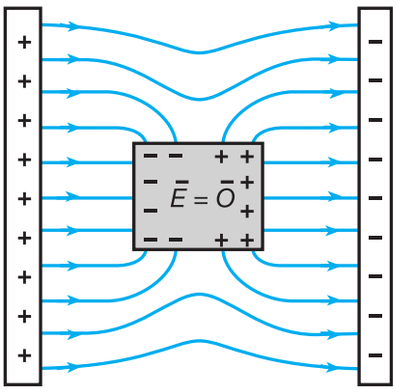
Herkät sähkölaitteet suojataan usein ulkoisilta sähkökentiltä asettamalla niiden ympärille metallisuojus, niin sanottu **Faradayn häkki**. Sähkökenttä ei pääse metallisuojuksen sisälle. Esimerkiksi auton kori muodostaa Faradayn häkin. Salaman iskiessä autoon salaman sähkövaraus siirtyy auton ulkopintaa pitkin pyörien kautta maahan. Renkaat ovat osittain sähköä eristävää kumia, mutta sähköpurkaus voi mennä maahan joko kumin läpi ja samalla rikkoa sen tai kumin pintaa pitkin sen ollessa märkä.

Terävä neula purkaa nauhageneraattorin pallon varauksen.

Terävät kärjet purkavat lentokoneen pintaan syntyvän hankaussähkön.

Oppilastyö ▪ Sähköinen influenssi

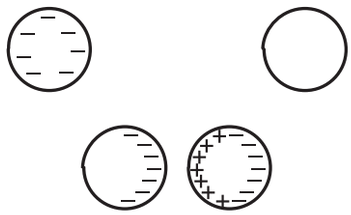
Kaada laakeaan muoviastiaan risiiniöljyä. Pane öljyyn kaksi yhdensuuntaista, suoraa elektrodia ja niiden väliin suorakulmion muotoinen metallikappale. Ripottele öljyyn mannasuurimoita ja yhdistä elektrodit nauhageneraattoriin. Tutki, miten suurimot asettuvat elektrodien ja metallin suhteen, kun varaat nauhageneraattoria.



Suorakulmion muotoinen johdekappale sähkökentässä.

Sähköinen voima siirtää kentässä olevan johdekappaleen vapaita elektroneja kentän suuntaa vastaan kohti kappaleen reunaa, joka varautuu negatiivisesti. Johdekappaleen vastakkainen reuna jää varaukseltaan positiiviseksi. Rakenteessa kiinni olevat positiiviset ionit eivät siirry. Tällaista ulkoisen sähkökentän johteessa aiheuttamaa varausten erottumista sanotaan **sähkövarausten jakautumiseksi** eli **sähköiseksi influenssiksi**. Syntyneitä, erimerkkisiä varauksia kutsutaan influenssivarauksiksi. Niiden sähkökenttä on kappaleen sisällä alkuperäiselle kentälle vastakkainen. Kun johdekappaleen sisäinen kenttä kumoaa ulkoisen, elektronien siirtyminen lakkaa. Sähkökentän voimakkuus $\bar{E}$ johdekappaleen sisällä on nolla. Kun ulkoinen kenttä häviää, myös influenssivaraukset tasoittuvat.

Johde ja sähkökenttä
Sähkökentän johteessa aiheuttamaa positiivisen ja negatiivisen varauksen erottautumista toisistaan sanotaan sähköiseksi influenssiksi.
Varatun johdekappaleen sähkövaraus kerääntyy kappaleen ulkopinnalle.
Kappaleen kärjissä on suurin varaustiheys.
Sähkökentän kenttäviivat ovat kohtisuorassa kappaleen pintaa vastaan.
Johdekappaleen sisällä sähkökentän voimakkuus on nolla.

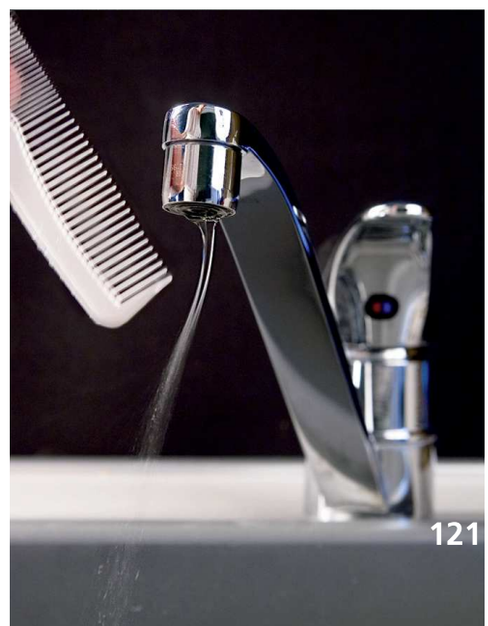


Varattu kappale aiheuttaa influenssin varaamattomassa johdekappaleessa.

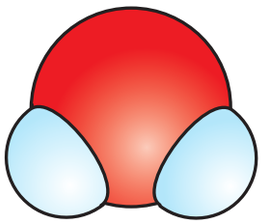
Varatun kappaleen kyky vetää puoleensa varaamatonta kappaletta perustuu johteen tapauksessa influenssi-ilmiöön ja eristeen tapauksessa polarisoitumiseen. Varaamattomissa kappaleissa on aina positiivista ja negatiivista sähkövarausta yhtä paljon. Sähköisen pölysuodattimen toiminta perustuu sähkökentän aiheuttamaan influenssiin ja polarisoitumiseen pölyhiukkasissa. Polarisoitumista tarkastellaan eristeiden yhteydessä.

Eriste sähkökentässä

Oppilastyö ▪ Dipoli sähkökentässä
1. Hankaa ilmapalloa vaatteisiin ja vie pallo sen jälkeen seinälle. Tutki ilmapallon pysymistä erilaisilla seinäpinnoilla.
2. Kun kampaat puhtaita hiuksia tai hankaat kampaa villavaatteeseen, kampa varautuu. Vie kampa aivan lähelle ohutta vesivanaa ja tarkkaile vesivanan taipumista.



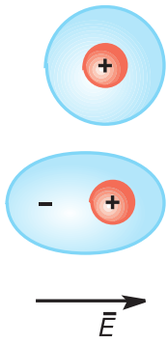
Eriste on aine, jossa ei ole vapaita varauksenkuljettajia tai niitä on erittäin vähän. Elektronit ovat tiukasti kiinni eristeen rakenteen sidoksissa. Sähkökenttään tuodussa eristekappaleessa varauksenkuljettajat eivät pääse liikkumaan. Jos eristekappaleella kosketaan varattua metallikappaletta, elektronien siirtyminen kappaleiden välillä on vähäistä.



Vesimolekyyli.

Eriste voi koostua **pysyvistä dipolimolekyyleistä**, joiden sähkövaraus on jakautunut molekyylin sisällä. Molekyylin toisen pään varaus on $+q$ ja toisen $-q$. Kokonaisvaraus on siis nolla. Esimerkiksi vesimolekyyli on pysyvä dipoli. Sähkökentässä dipoli kääntyy kentän suuntaiseksi. Homogeenisessa kentässä dipoliin vaikuttava kokonaisvoima on nolla. Epähomogeenisessa kentässä dipoliin vaikuttaa kokonaisvoima, jonka suunta on sinne, missä kenttä on voimakkaampi. Tästä syystä vesihöyry purkaa staattisia varauksia tehokkaasti.

Oppilastyössä kammassa oleva sähkövaraus luo ympärilleen epähomogeenisen sähkökentän. Kamman varaukset ovat vuorovaikutuksessa vesimolekyyleihin. Varausten luoma sähkökenttä on epähomogeeninen, ja vesimolekyylit ovat sähköisiä dipoleja. Vesimolekyyleihin kohdistuva sähköinen vetovoima taivuttaa vesivanaa.



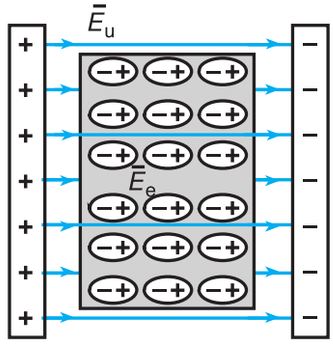
Atomin polarisoituminen ulkoisessa sähkökentässä.

Vaikka molekyylit eivät olisikaan dipoleja, sähkökenttä voi aiheuttaa niissä **sähköisen polarisoitumisen** eli molekyylin sisäisen varauksen jakautumisen. Molekyylin positiivisten ja negatiivisten varausten varauskeskipisteet erkanevat toisistaan. Näin syntyneet **pysymättömät dipolimolekyylit** voivat asettua sähkökentän suuntaisesti. Hiilidioksidi on esimerkki tällaisesta molekyylista. Polarisoituminen tapahtuu myös sähkökentässä olevissa atomeissa.

Jos eristekappaleen lähelle tuodaan varattu kappale, molekyylit kääntyvät eristeen sisällä sähkökentän suuntaisiksi eli eristeessä tapahtuu rakennehiukkasten polarisoitumista, mutta sähkövaraukset eivät siirry kappaleen pinnalle. Esimerkiksi kampa, jolla on kammattu kuivia hiuksia, vetää puoleensa varaamatonta paperisilppua, koska paperissa tapahtuu polarisoituminen.

Oppilastyössä ilmapallo varattiin sähköisesti hankaamalla sitä vaatteisiin. Seinän eristepinnan lähellä varattu ilmapallo aiheuttaa polarisoitumisen. Seinän ja pallon välille syntyy sähköinen

vuorovaikutus, joka ilmenee vetävänä voimana. Jos ilmapalloa hangataan suoraan seinään, seinän ja pallon välinen vetovoima on kuitenkin enimmäkseen peräisin hankaussähköilmiön aiheuttamasta kappaleiden erimerkkisestä varautumisesta.



Eristekappaleen polarisoituneet molekyylit suuntautuvat sähkökentässä.

Polarisoitumisessa kappaleeseen syntyy sisäinen dipolien luoma sähkökenttä, jonka voimakkuus on $\bar{E}_s$. Eristeessä sähkökentän voimakkuus $\bar{E}_e$ on ulkoisen kentän (u) ja sisäisen kentän (s) kenttävoimakkuuksien summa: $\bar{E}_e = \bar{E}_u + \bar{E}_s$. Sisäinen ja ulkoinen kenttä ovat vastakkaissuuntaisia, joten $E_e = E_u - E_s$.

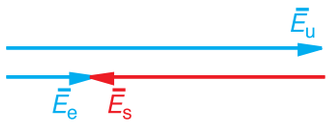
Eristeen suhteellinen permittiivisyys

Eristeen suhteelliseksi permittiivisyydeksi ε_r sanotaan eristeen ulkopuolella olevan sähkökentän voimakkuuden $\bar{E}_u$ ja sisäpuolella olevan sähkökentän voimakkuuden $\bar{E}_e$ suhdetta:

$$\varepsilon_r = \frac{E_u}{E_e}.$$

Kaikille eristeaineille $\varepsilon_r > 1$ (tyhjiölle $\varepsilon_r = 1$).

Eristeen suhteellinen permittiivisyys ε_r kuvaa, miten eriste vaikuttaa sähköiseen voimaan.



Eristessä sähkökentän voimakkuuden suuruus on $E_e = \frac{E_u}{\varepsilon_r}$. Jos eristeen suhteellinen permittiivisyys ε_r on suuri, sähkökentän voimakkuus $\bar{E}_e$ eristeessä on pieni.

Eriste ja sähkökenttä

Sähkökentän aiheuttamaa eristeen rakennehiukkasten kääntymistä kentän suuntaisiksi sanotaan sähköiseksi polarisoitumiseksi.

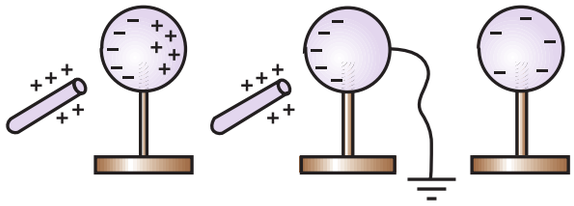
Polarisoitumisessa eristekappaleen sisälle syntyy sähköisten dipolien luoma sähkökenttä, jonka suunta on vastakkainen ulkoiselle sähkökentälle.

Eristekappaleen sisällä sähkökenttä on heikompi kuin kappaleen ulkopuolella.

Aine, jonka suhteellinen permittiivisyys on suuri, heikentää sähkökenttää enemmän kuin aine, jonka suhteellinen permittiivisyys on pieni.

Pohdi ja etsi

2-73. Kuvassa esitetään johdekappaleen varaaminen influenssia käyttäen. Selitä tapahtuma.



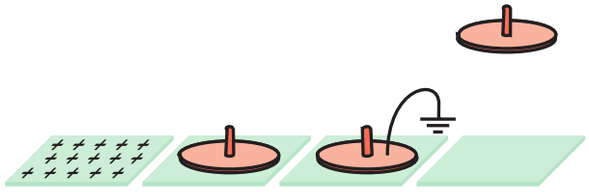
2-74. Suuren metallipallon viereen tuodaan pieni positiivisesti varautunut pallo. Piirrä suuremman pallon varausjakauma.

2-75. a) Miksi positiivisesti varattu muovilusikka vetää puoleensa pieniä varaamattomia paperipalasia?
b) Kun puhallettua ilmapalloa hangataan esimerkiksi villapaitaan, pallo varautuu sähköisesti. Miksi ilmapallo tarttuu kiinni seinään tai kattoon, vaikka niitä ei ole hangattu?
c) Miksi alumiinipintaisen vappuilmapallon sähkövaraus voi olla hyvin suuri?

2-76. a) Negatiivisesti varatulla eboniittisauvalla kosketetaan elektroskooppia. Mitä tapahtuu? Millaisen varauksen saa elektroskoopin pää? Entä millaisen varauksen saavat elektroskoopin liuskat?
b) Positiivisesti varattu lasisauva viedään varaamattoman elektroskoopin pään lähelle. Selitä, mitä tapahtuu. Miksi liuskat heilahtavat yhteen, kun elektroskoopin päätä kosketetaan sormella?

2-77. a) Miksi onkiminen voi olla vaarallista sähkölinjojen alla?
b) Missä muissa tilanteissa sähkölinjat voivat olla vaaraksi?

2-78. Varataan muovilevy sähköisesti hankaamalla sitä. Tuodaan levyn lähelle sähköisesti neutraali elektrofori. Elektroforissa metallirasiaan on kiinnitetty eristekahva. Maadoitus voidaan tehdä esimerkiksi koskettamalla sormella rasian yläpintaa. Merkitse kuvasarjaan elektroforin varaus kussakin tapauksessa.



2-79. Kun viet positiivisesti varatun sauvan ohuen vesinoron lähelle, vesinoro taipuu sauvaa kohti.
a) Selitä tämä tapahtuma.
b) Mitä tapahtuu, kun viet vesinoron lähelle negatiivisesti varatun sauvan?

2-80. a) Miksi vaatteita pestäessä käytetään usein huuhteluainetta?
b) Miksi kuivausrummussa kuivatetut vaatteet ovat usein sähköisempiä kuin narulla kuivatetut?

2-81. Nauhageneraattorin päälle on kiinnitetty kuparilanka. Miten kynttilän liekkiin osuva tuuli syntyy, kun generaattori varataan?

Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Hohtolampulla kosketetaan kappaletta, jolloin lamppu välähtää kappaleen puoleisesta päästä. Tämä osoittaa, että
a) kappaleen varaus on negatiivinen
b) kappaleen varaus on positiivinen
c) kappaleella on varausta, mutta sen etumerkkiä ei voi päätellä.

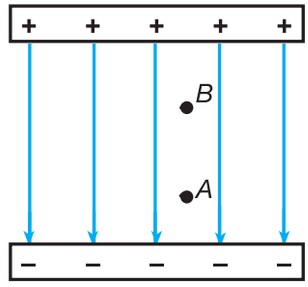
2. Kuution vastakkaisissa kärjissä on 2,0 nC:n varaukset. Kuution särmän pituus on 1,0 m. Väliaineena on ilmaa. Varausten välisen hylkimisvoiman suuruus on
a) 12 nN
b) 21 nN
c) 36 nN.

3. Sähkövarausten välinen voima vedessä on
a) pienempi
b) yhtä suuri
c) suurempi
kuin tyhjiössä.

4. Pistevarauksen sähkökentässä
a) sähkökentän voimakkuus on vakio
b) sähkökentän voimakkuus pienenee etäisyyden kasvaessa (kentän aiheuttajavaraukseen nähden)
c) potentiaali pienenee etäisyyden kasvaessa.

5. Sähkökentässä olevaan varauksiseen hiukkaseen vaikuttava sähköinen voima voi olla
a) kohtisuora
b) vastakkaissuuntainen
c) samansuuntainen
sähkökentän suuntaan nähden.

6. Kuvan homogeenisessa sähkökentässä kentän potentiaali pisteessä *A* on
a) pienempi b) yhtä suuri c) suurempi
kuin pisteessä *B*.



7. Edellisen kuvan sähkökentässä levyjen välimatka on 5,0 cm ja niiden välinen potentiaaliero 120 V. Sähkökentän voimakkuus levyjen välissä on
a) 6 V/m b) 120 V/m c) 2,4 kV/m.

8. Edellisen kuvan sähkökentässä protoni siirretään pisteestä *A* pisteeseen *B*. Tällöin
a) kenttä tekee siirtotyötä
b) siirtämiseen tarvitaan ulkoista työtä
c) siirtämiseen ei tarvita ulkoista työtä, koska siirtymä tapahtuu kenttäviivojen suunnassa.

9. Levosta lähtevää elektronia kiihdytetään 400 V:n jännitteellä. Elektronin saama nopeus on
a) 0,12 Mm/s b) 1,2 Mm/s c) 12 Mm/s.

10. Johdekappaleessa
a) varaus asettuu pinnalle
b) varaustiheys on suurin terävissä kärjissä
c) sähkökentän voimakkuus on nolla kappaleen sisällä.

Tiivistelmä

- Sähkövaraus on kappaleen tai hiukkasen ominaisuus.
  Kappaleen varaus Q on aina alkeisvarauksen monikerta: $Q = \pm ne$.
  Samanmerkkiset varaukset hylkivät toisiaan, ja erimerkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa.
  Kahden pistemäisen varatun hiukkasen välinen sähköinen voima noudattaa Coulombin lakia,

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_\mathrm{r}}\frac{Q_1Q_2}{r^2} = \frac{k}{\varepsilon_\mathrm{r}}\frac{Q_1Q_2}{r^2}.$$

- Jokaisen varatun kappaleen ympärillä on sähkökenttä.
  Sähkökentän kenttäviivat lähtevät positiivisesti varautuneen kappaleen pinnasta ja päättyvät negatiivisesti varatun kappaleen pintaan.
  Kenttäviivojen tiheys kuvaa kentän voimakkuutta.

  Sähkökentän voimakkuus on $\overline{E} = \frac{\overline{F}}{q}$.

  Pistevarauksen sähkökentän voimakkuus on $E = \frac{k}{\varepsilon_\mathrm{r}}\frac{Q}{r^2}$.

- Homogeenisen sähkökentän
  - voimakkuus on $E = \frac{U}{d}$
  - potentiaali pisteessä A on $V_A = \frac{E_{\mathrm{p}A}}{q} = qEx$
  - pisteiden A ja B välinen jännite eli potentiaaliero on $U_{AB} = V_A - V_B$.

- Sähkökenttä antaa varatulle hiukkaselle kiihtyvyyden $\overline{a} = \frac{\overline{F}}{m} = \frac{q\overline{E}}{m}$.
  Mekaanisen energian säilymislaki sähkökentässä on

$$E_\mathrm{pa} + E_\mathrm{ka} = E_\mathrm{pl} + E_\mathrm{kl} \text{ eli } qV_\mathrm{a} + \frac{1}{2}mv_\mathrm{a}^2 = qV_\mathrm{l} + \frac{1}{2}mv_\mathrm{l}^2.$$

- Ulkoinen sähkökenttä aiheuttaa johteessa sähkön jakautumisen eli influenssin.
  Eristeen dipolimolekyylit kääntyvät ulkoisen sähkökentän suuntaisesti.
  Eristeessä voi tapahtua myös sähköinen polarisoituminen.

3 Kondensaattori

Tässä luvussa opit

- **kondensaattorin varaamisen ja purkamisen**
- **kondensaattorien kytkennät.**

Keskeisiä käsitteitä ovat

- **kondensaattorin varaus ja kapasitanssi**
- **kondensaattorin energia.**

Kondensaattori

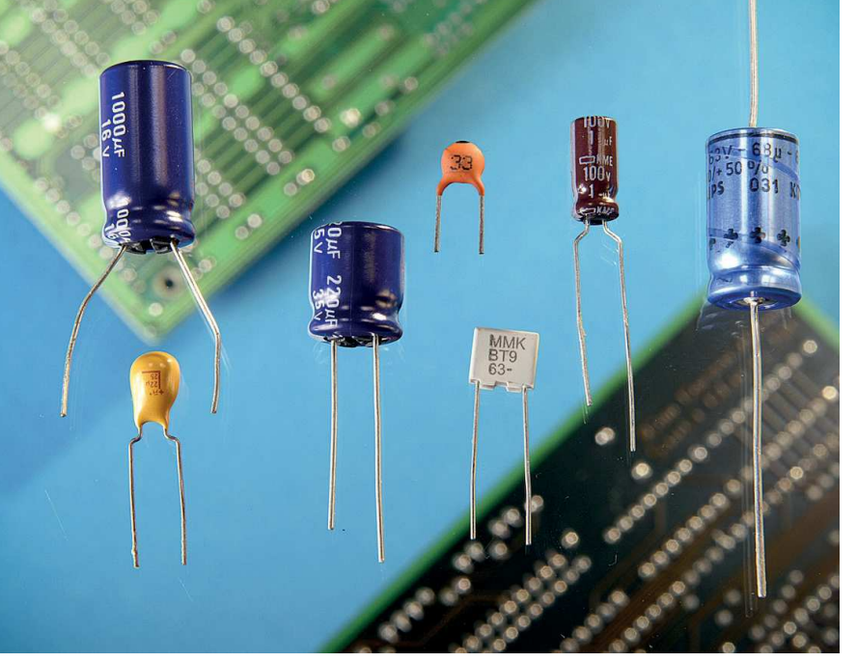
Kondensaattori (lat. *condensare*, 'tiivistää') on sähkötekniikan peruskomponentti. Se muodostuu kahdesta lähekkäin olevasta johdekappaleesta, joiden välissä on eristekerros.

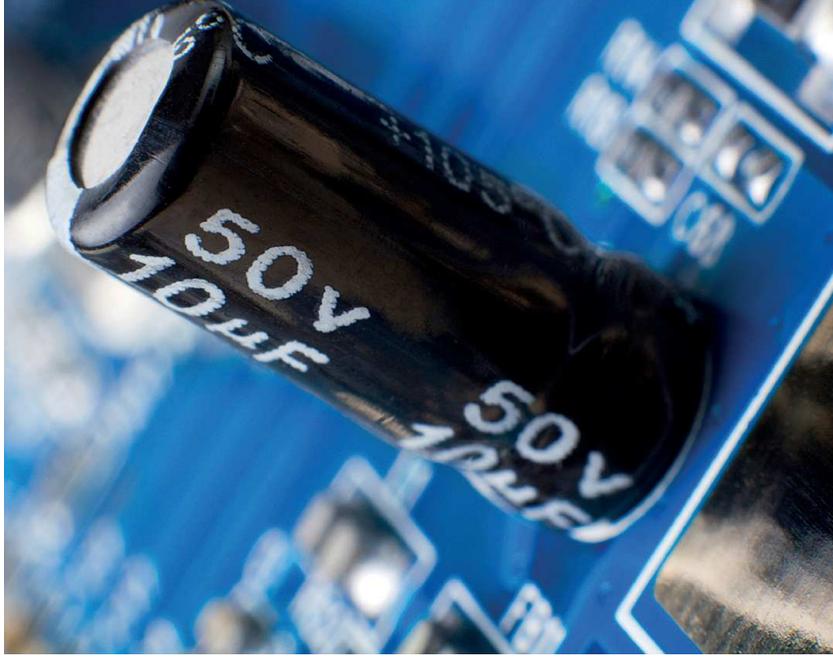
Kondensaattoreihin voidaan varastoida sähkövarausta ja energiaa. Niitä käytetään joissakin virtakatkaisimissa estämään kipinöintiä katkaisuhetkellä. Kondensaattoria voidaan käyttää myös mittalaitteena. Kun levyjen välinen etäisyys muuttuu esimerkiksi paineen vaikutuksesta, kondensaattorin sähkönvaraamiskyky muuttuu. Muutos voidaan mitata. Esimerkiksi kiihtyvyysantureissa ja paikkasensoreissa käytetään kondensaattoreita.

Kondensaattori voi olla levy- tai säätökondensaattori. Kondensaattorityyppejä ovat mm. polyesterikondensaattorit ja elektrolyyttikondensaattorit. Elektrolyyttikondensaattoreilla on suurempi sähkönvaraamiskyky kuin muilla ulkoisilta mitoiltaan samankokoisilla kondensaattoreilla.

Kondensaattorien avulla voidaan mallintaa monia luonnonilmiöitä, esimerkiksi ukkosta. Ukkosessa kondensaattorin muodostavat ukkospilvi ja maanpinta. Pilvi varautuu jää- ja lumikiteiden hankauksesta. Kevyet kiteet siirtyvät pilven yläreunaan, joka saa positiivisen sähkövarauksen. Pilven alareunan negatiivinen sähkövaraus indusoi puolestaan maanpinnalle positiivisen sähkövarauksen. Suurin varaustiheys on korkeissa ja kapeissa kohdissa, kuten puiden latvoissa ja kirkontorneissa. Tässä luonnon kondensaattorissa tapahtuvaa läpilyöntiä kutsutaan salamaksi.

Kondensaattorin piirrosmerkki.

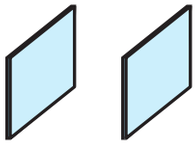




Kondensaattoriin on merkitty sen ominaisuuksia.

3.1 Kapasitanssi

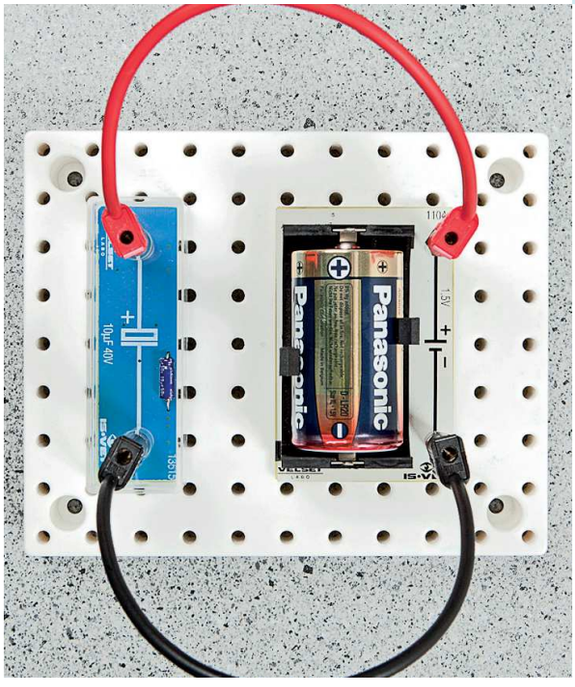
a)



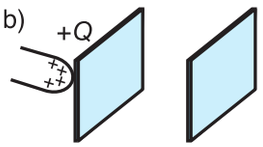
Varaamaton kondensaattori.

Oppilastyö ▪ Kondensaattori

Aseta kaksi yhdensuuntaista johdelevyä vastakkain lähelle toisiaan. Kosketa toista levyä positiivisesti varatulla lasisauvalla, jolloin elektroneja siirtyy levyltä sauvaan ja levy saa positiivisen varauksen $+Q$. Maadoita toinen levy. Influenssin vaikutuksesta maadoitettuun levyyn siirtyy maasta yhtä suuri mutta vastakkaismerkkinen varaus $-Q$. Irrota maadoitus. Olet valmistanut ja ladannut kondensaattorin.

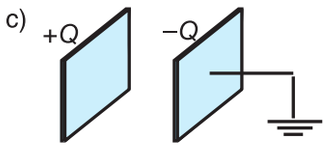


b)



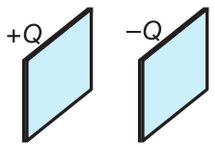
Kosketuksesta johtuen toisen levyn varaus on $+Q$.

c)



Maadoitettu levy saa sähköisen influenssin takia varauksen $-Q$.

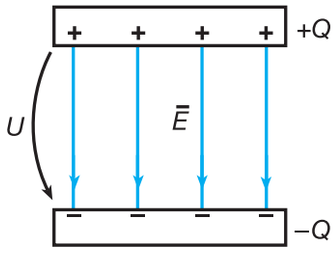
d)



Maadoitus on poistettu. Kondensaattorin varaus on Q.

Kondensaattori voidaan varata myös pariston avulla. Silloin pariston plusnapaan kytketty johdelevy varautuu positiivisesti ja toinen johdelevy negatiivisesti.

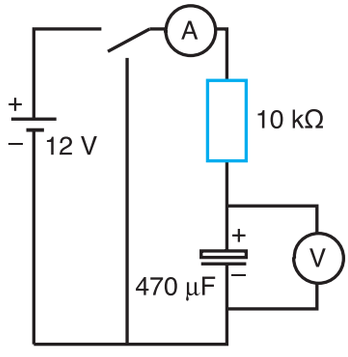
Kun varattuun johdekappaleeseen tuodaan kappaleen varauksen kanssa samanmerkkinen varaus, sähköistä voimaa vastaan on tehtävä työtä. Varaus asettuu johdekappaleen pinnoille, ja siirtävän voiman tekemä työ ilmenee kappaleen sähköisen potentiaalienergian lisääntymisenä.



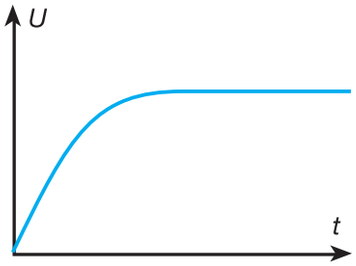
Kaksi lähekkäin olevaa varautunutta johdelevyä muodostavat **levykondensaattorin**. Levyn varaukset asettuvat tasaisesti levyjen sisäpinnalle, koska vastakkaismerkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa. Varatun kondensaattorin johdelevyjen välillä on potentiaaliero eli jännite U ja sähkökenttä. Sähkökentän voimakkuus on $\overline{E}$. Varatulla kondensaattorilla on sähköisestä vuorovaikutuksesta johtuvaa potentiaalienergiaa. Huomaa, että kondensaattorin varauksella tarkoitetaan kummallakin levyllä olevan varauksen ($+Q$ ja $-Q$) itseisarvoa Q.

Kondensaattori
Kondensaattori on kahden lähekkäin olevan johdekappaleen muodostama systeemi.

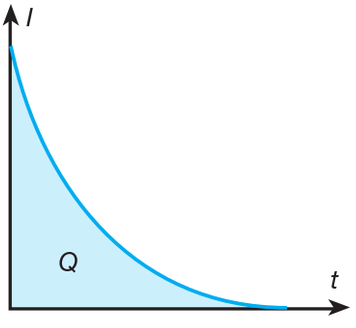
Oppilastyö ▪ Kondensaattorin kapasitanssi
Lataa kondensaattori jännitelähteen avulla. Lataamisen jälkeen pura kondensaattorin sähkövaraus vastuksen läpi. Mittaa tietokoneeseen liitetyn mittausjärjestelmän avulla kondensaattorin purkausvirta ajan funktiona. Toista mittaus käyttäen eri jännitteitä ja eri kondensaattoreita.



Eräs kytkentä kondensaattorin latauskäyrän ja purkausvirran mittaamiseksi.



Kondensaattorin latauskäyrä.

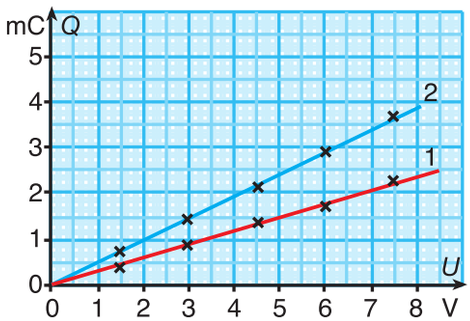


Kondensaattorin purkauskäyrä.

Kun kondensaattoria ladataan tasajännitteellä, sen levyt varautuvat. Piirissä havaitaan virta siis vain silloin, kun kondensaattori latautuu tai purkautuu – tasavirta ei kulje kondensaattorin läpi. Koska sähkövarauksen Q ja sähkövirran I välillä on yhteys $\Delta Q = I\Delta t$, purkauskäyrän ja aika-akselin väliin jäävä fysikaalinen pinta-ala vastaa kondensaattorin varausta.

Määritetään eri mittauksissa kutakin jännitettä vastaava sähkövaraus fysikaalisen pinta-alan avulla ja sijoitetaan lukuparit (U, Q)-koordinaatistoon.

U/V	Q/mC (kondensaattori 1)	Q/mC (kondensaattori 2)
7,5	2,30	3,75
6,0	1,70	2,85
4,5	1,30	2,10
3,0	0,84	1,40
1,5	0,39	0,69



Oppilastyön mittauksissa mittauspisteet asettuvat (U, Q)-koordinaatistossa mittaustarkkuuden rajoissa peräkkäin samalle origon kautta kulkevalla suoralle eli $Q \sim U$. Kondensaattorin varauksen Q ja levyjen välisen jännitteen U suhde pysyy siis vakiona. Tätä suhdetta kutsutaan kondensaattorin **kapasitanssiksi** (lat. *capacitas*, 'sisältämiskyky') C. Kuvaajasta havaitaan, että kondensaattorin 2 varaus on samalla jännitteellä suurempi kuin kondensaattorin 1 varaus. Ero johtuu kondensaattorien erilaisesta rakenteesta.

Kondensaattorin kapasitanssi ja varaus
Kondensaattorin kapasitanssi on kondensaattorille ominainen suure, joka kuvaa kondensaattorin sähkönvaraamiskykyä. Kondensaattorin sähkövaraus Q ja jännite U ovat verrannolliset: $Q = CU$, jossa C on kondensaattorin kapasitanssi.

SI-järjestelmässä kapasitanssin yksikkö on

$$[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{1\,\text{C}}{1\,\text{V}} = 1\,\text{F (faradi)}.$$

Kondensaattorin kapasitanssin voi mitata kapasitanssimittarilla, usein myös yleismittarilla.

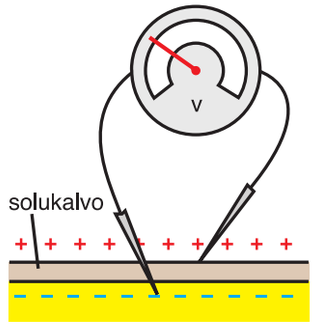
Faradi on erittäin suuri kapasitanssin yksikkö. Kondensaattorien kapasitanssit ovat suuruusluokaltaan tavallisesti piko-, nano- tai mikrofaradeja.

Oppilastyössä kondensaattorin 1 kapasitanssiksi saadaan

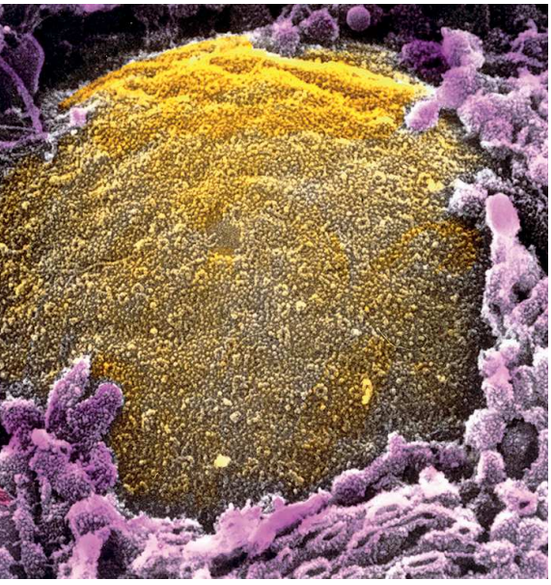
$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{Q_2 - Q_1}{U_2 - U_1} = \frac{2{,}0\ \text{mC} - 0{,}0\ \text{mC}}{6{,}8\ \text{V} - 0{,}0\ \text{V}} \approx 290\ \mu\text{F}.$$

Esimerkki 1

Kun solukalvon sisä- ja ulkopintaa tarkastellaan kondensaattorina, kalvoon liittyvä kapasitanssi on 0,10 µF. Pintojen välillä on 100 mV:n jännite. Kuinka suuri on solukalvon pinnalla oleva sähkövaraus?



$U = 100\ \text{mV}, \quad C = 0{,}10\ \mu\text{F}$



Solukalvon pinnalla oleva sähkövaraus on

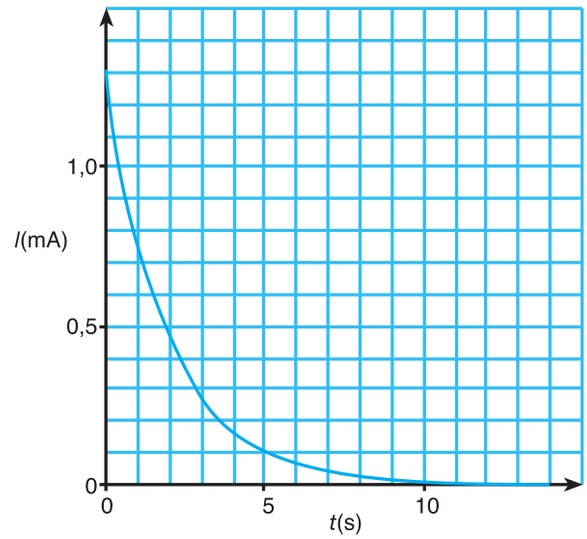
$$Q = CU = 0{,}10\ \mu\text{F} \cdot 100\ \text{mV} = 10\ \text{nC}.$$

Sähkövaraus on 10 nC. (Esimerkki vastaa 0,1 cm^2:n kokoisen solukalvon osan tarkastelua.) Sähkövaraus johtuu ionien Na^+, K^+ ja Cl^- pitoisuuksista solukalvon molemmin puolin.

Solukalvot ovat elimistön omia kondensaattoreita. Kalvo itse on eristekerros, jonka sisä- ja ulkopintojen välillä on millivolttien suuruusluokkaa oleva jännite. Jännite vaikuttaa molekyylien ja ionien virtaamiseen solukalvojen läpi ja siten solujen aineenvaihduntaan.

Esimerkki 2

Kondensaattori ladattiin akulla 6,25 V:n jännitteeseen, minkä jälkeen kondensaattorin annettiin purkautua vastuksen läpi. Kun purkausvirta mitattiin tietokoneavusteisesti, saatiin oheisen kuvaajan mukainen tulos.



a) Kuinka suuri oli ladatun kondensaattorin varaus?
b) Määritä kondensaattorin kapasitanssi.
c) Määritä vastuksen resistanssi. [K2010, 7]

$U = 6{,}25$ V

a) Sähkövirran kuljettama varaus aikavälinä Δt on $\Delta Q = I \cdot \Delta t$, jos sähkövirta on vakio. Ladatun kondensaattorin sähkövaraus lasketaan (I, t)-koordinaatistossa virtakäyrän ja aika-akselin väliin jäävän fysikaalisen pinta-alan avulla. Pinta-ala koostuu noin 25 ruudusta, ja yhden ruudun pinta-ala on $1{,}0 \text{ s} \cdot 0{,}10 \text{ mA} = 0{,}10 \text{ mC}$. Ladatun kondensaattorin varaus oli $Q = 25 \cdot 0{,}10 \text{ mC} = 2{,}5 \text{ mC}$.

b) Koska ladatun kondensaattorin jännite oli $U = 6{,}25$ V ja varaus $Q = 2{,}5$ mC, kondensaattorin kapasitanssi on

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2{,}5 \text{ mC}}{6{,}25 \text{ V}} = 0{,}40 \text{ mF}.$$

c) Kondensaattorin purkamisen alkuhetkellä jännite on $U = 6{,}25$ V ja virta kuvaajan mukaan $I = 1{,}31$ mA, joten purkamisessa käytetyn vastuksen resistanssi on

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6{,}25 \text{ V}}{1{,}31 \text{ mA}} \approx 4{,}8 \text{ k}\Omega.$$

Kondensaattorin varaus on 2,5 mC ja kapasitanssi 0,40 mF. Vastuksen resistanssi on 4,8 kΩ.

3.2 Levykondensaattori

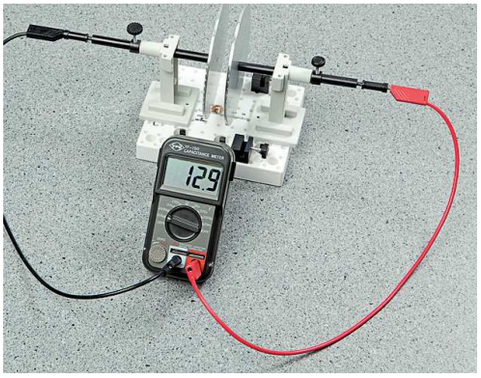
Oppilastyö ▪ Levykondensaattorin kapasitanssi

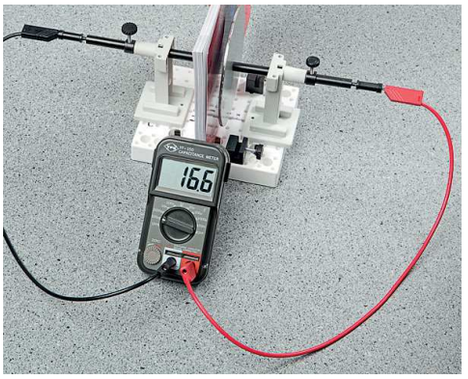
Kytke kapasitanssimittari levykondensaattorin levyihin. Varaa kondensaattori.

1. Suurenna ja pienennä levyjen välimatkaa ja vertaa mittarin lukemia.

2. Pienennä levyjen vastakkain olevaa pinta-alaa siirtämällä toista levyä sivulle. Siirrä levy takaisin toisen levyn kohdalle. Tarkkaile mittarin lukemaa.

3. Aseta levyjen väliin eriste, esimerkiksi paperia. Vertaa mittarin lukemia.





Oppilastyön kohdassa 1 havaitaan, että levyn välimatkan kasvaessa kondensaattorin kapasitanssi pienenee: kapasitanssi on kääntäen verrannollinen levyjen väliseen etäisyyteen. Kohdassa 2 levyjen vastakkain olevien pinta-alojen pienentyessä myös kapasitanssi pienenee. Kohdassa 3 eristeen lisääminen kondensaattorin levyjen väliin kasvattaa kondensaattorin kapasitanssia.

Oppilastyössä havaitut riippuvuudet voidaan selittää myös levyjen väliin syntyvällä homogeenisella sähkökentällä. Kondensaattorin levyjen välissä sähkökentän voimakkuus $\vec{E}$ on vakio riippumatta levyjen välimatkasta, koska sähkövaraus ei pääse siirtymään. Kun kondensaattorin levyjen välimatka kasvaa, niiden välinen jännite kasvaa yhtälön $U = Ed$ mukaisesti.

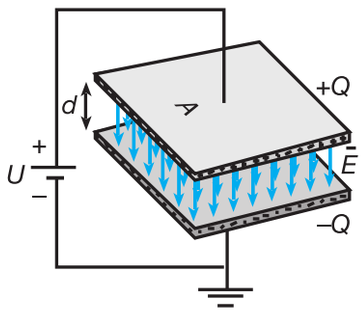
Koska kondensaattorin sähkövaraus ei muutu, yhtälöistä $C = \frac{Q}{U}$ ja $U = Ed$ voidaan päätellä, että levykondensaattorin kapasitanssi pienenee levyjen välimatkan kasvaessa. Kapasitanssi on siis kääntäen verrannollinen levyjen välimatkaan eli $C \sim 1/d$.

Vaikka kondensaattorin levyjen vastakkain olevaa pinta-alaa muutetaan, kondensaattorin sähkövaraus pysyy vakiona. Koska erimerkkiset sähkövaraukset vetävät toisiaan puoleensa, varaukset asettuvat vastakkain oleville levyjen osille. Sähkökentän voimakkuus on sitä suurempi, mitä tiheämmässä varaukset ovat: levyjen välinen jännite $U = Ed$ kasvaa, jos levyjen pinta-alaa pienennetään ja niiden välimatka d ei muutu. Kun jännite kasvaa, kapasitanssi pienenee yhtälön $C = \frac{Q}{U}$ mukaisesti. Kapasitanssi ja pinta-ala ovat siis suoraan verrannolliset eli $C \sim A$.

Eristeen asettaminen levyjen väliin pienentää sähkökentän voimakkuutta eristemateriaalin sähköisen polarisoitumisen takia, joten kondensaattorin jännite pienenee. Eristeen suhteellinen permittiivisyys ε_r ilmaisee eristeaineen kyvyn heikentää sähkökenttää. Mitä suurempi väliaineen suhteellinen permittiivisyys on, sitä heikompi on levyjen välinen sähkökenttä. Eristeen lisääminen levyjen väliin pienentää jännitettä ja siis suurentaa kapasitanssia eli $C \sim \varepsilon_r$.

Kondensaattorin levyjen välissä käytetään eristettä estämään varausten purkautuminen. Eristeen materiaali ja paksuus määräävät kondensaattorin jännitekeston eli rajajännitteen, jonka kondensaattori kestää niin, ettei levyjen välillä tapahdu läpilyöntiä eli sähkönpurkausta. Läpilyönnissä eristeen läpi iskevä kipinä purkaa levyjen varauksen ja rikkoo kondensaattorin.

Aine	ε_r	Läpilyönti-kestävyys kV/mm
ilma	1,0006	4,7
paperi	5	15
posliini	6	35
lasi	7	25
vesi	81	30



Levykondensaattori kytkettynä jännitelähteeseen.

Levykondensaattorin kapasitanssi
Levykondensaattorin kapasitanssi on

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d},$$

jossa ε on eristeen permittiivisyys, ε_r eristeen suhteellinen permittiivisyys, ε_0 tyhjiön permittiivisyys, A kondensaattorilevyn pinta-ala ja d levyjen välimatka.

Esimerkki 3

Levykondensaattorin levyjen välinen etäisyys on 0,10 mm ja käytetyn eristeen suhteellinen permittiivisyys 5,0. Levyn pinta-ala on 23 cm^2. Laske levykondensaattorin kapasitanssi.

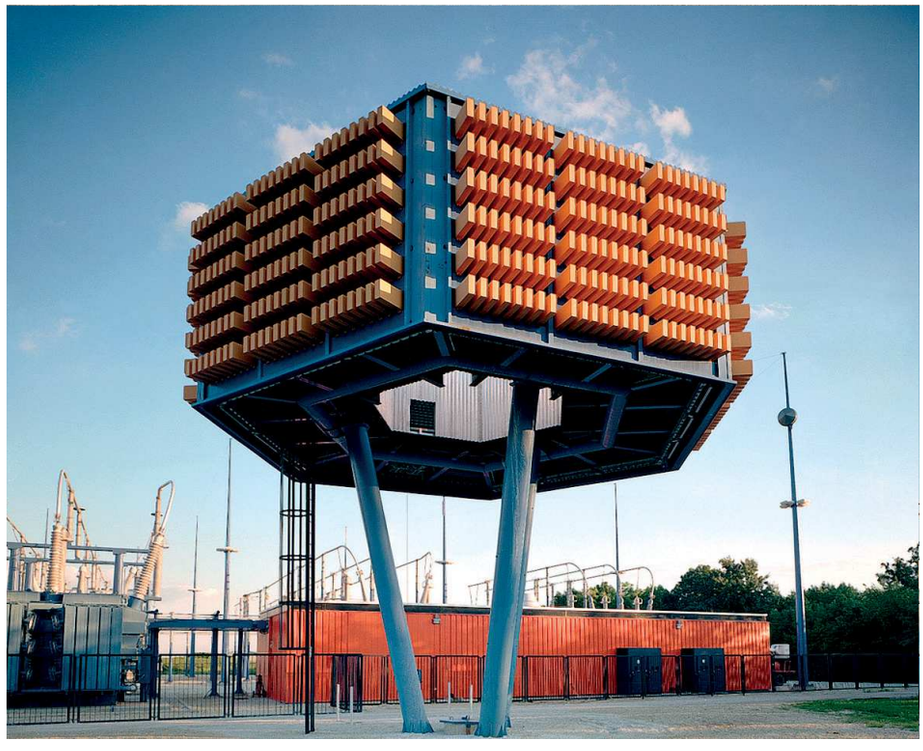
$d = 0{,}10\ \text{mm} = 0{,}00010\ \text{m}, \quad \varepsilon_\text{r} = 5{,}0, \quad A = 23\ \text{cm}^2,$
$\varepsilon_0 = 8{,}85419 \cdot 10^{-12}\ \text{F/m}$

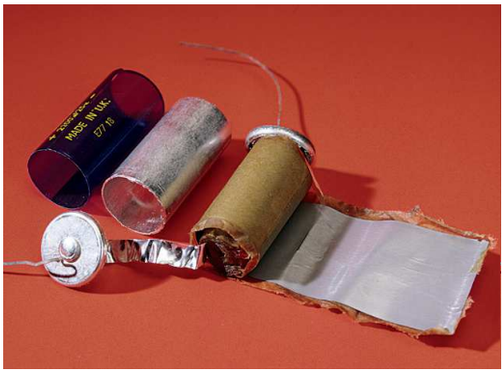
Levykondensaattorin kapasitanssi on

$$C = \varepsilon_\text{r}\varepsilon_0 \frac{A}{d} = 5 \cdot 8{,}85419 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot \frac{23 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2}{0{,}00010\ \text{m}} \approx 1{,}0\ \text{nF}.$$

Kapasitanssi on 1,0 nF.

Yksi maailman suurimmista kondensaattoreista (kuvassa) sijaitsee Yhdysvalloissa, tutkimuskeskus Fermilabissa. Kondensaattoria käytetään hiukkaskiihdyttimien yhteydessä: siitä voidaan purkaa energiaa kiihdyttimien toimintaa varten. Tällaisia superkondensaattoreita voi käyttää jännitelähteenä, ja niiden kapasitanssi on faradien suuruusluokkaa.



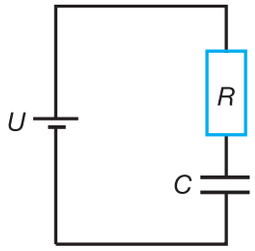


Levykondensaattorin rakenne. Levyinä toimivat metallifoliot (johde), joiden välissä on paperia (eriste). Levyjen pinta-ala vaikuttaa kondensaattorin kapasitanssiin, samoin paperin suhteellinen permittiivisyys.

Pohdi ja etsi

3-1. Leidenin pullo oli maailman ensimmäisiä kondensaattoreita.
a) Mistä nimi Leiden tulee?
b) Vertaa pullon rakennetta levykondensaattorin rakenteeseen.
c) Miksi Leidenin pullon keksiminen mullisti sähköopin tutkimuksen?

3-2. Kondensaattorin voi ladata oheisen kytkennän avulla. Miten latausjännitteen U, vastuksen resistanssin R ja kondensaattorin kapasitanssin C suuruus vaikuttavat ladattavan kondensaattorin varaukseen ja latautumisnopeuteen?

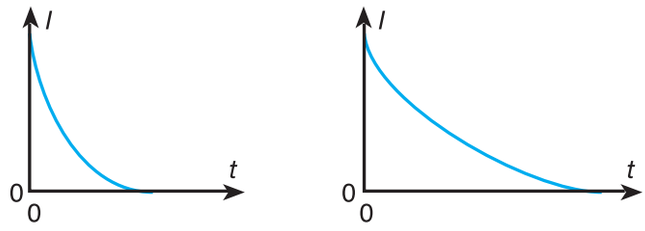


3-3. Kondensaattori, jonka levyjen välissä on ilmaa, varataan pariston avulla. Kondensaattori irrotetaan paristosta. Kuinka kondensaattorin varaus ja kapasitanssi muuttuvat, kun varaamisen jälkeen levyjen väli täytetään paperilla, jonka suhteellinen permittiivisyys on 5?

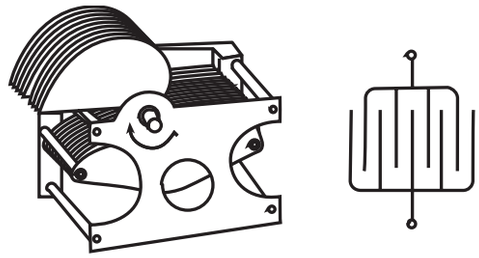
3-4. Levykondensaattorin jännite on U ja varaus Q. Kondensaattorin levyjen väli kasvatetaan kaksinkertaiseksi. Miten muuttuu kondensaattorin
a) varaus b) jännite
c) sähkökentän voimakkuus levyjen välissä?

3-5. Sivun yläosan kuvat esittävät samaan jännitteeseen varatun levykondensaattorin purkautumista samanlaisten vastusten kautta. Levykondensaattorin levyjen välissä on
a) ilmaa b) eristetäyte.
Mitä voit kuvaajien perusteella todeta eristetäytteen vaikutuksesta kondensaattorin kapasitanssin suuruuteen?

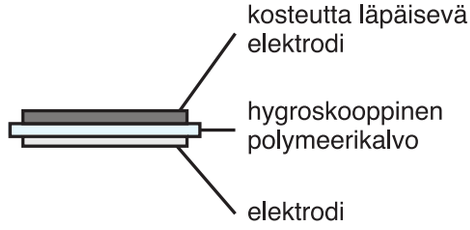
a) b)



3-6. a) Mistä tekijöistä riippuu levykondensaattorin kapasitanssi?
b) Selosta oheisten kuvien esittämän säätökondensaattorin toimintaperiaate.



c) Oheinen periaatekuvio esittää kapasitiivisen kosteusanturin rakennetta. Minkä vuoksi anturin kapasitanssi muuttuu ilman kosteuden muuttuessa? [S1999, 7]

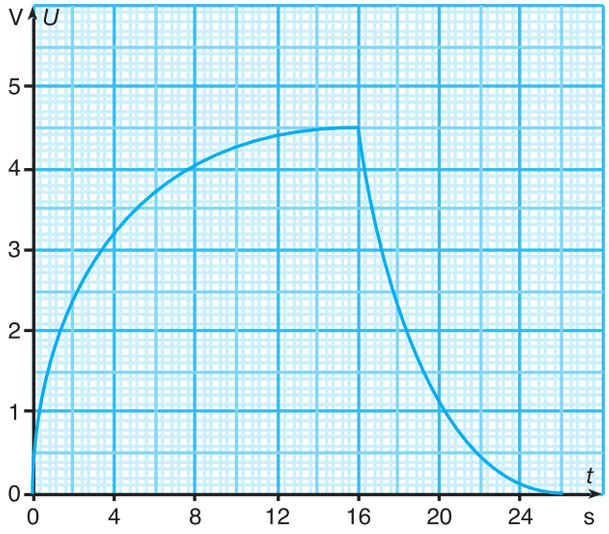


3-7. Kiihtyvyysanturia käytetään mm. autojen turvatyynyissä, kännyköissä, askelmittareissa ja peliohjaimissa. Selvitä, miten kiihtyvyysanturi liittyy kondensaattoriin.

3-8. Kosketusnäytöt ovat yleistyneet puhelimissa ja tietokoneissa. Selvitä, mikä ero on kapasitiivisella ja resistiivisella kosketusnäytöllä.

Tehtäviä

3-9. Kuvaaja esittää kondensaattorin jännitettä ajan funktiona. Kondensaattori varattiin paristo avulla ja varaus purettiin sarjaan kytketyn 2,6 kΩ:n vastuksen kautta.



a) Piirrä kytkentäkaavio.
b) Kuinka suuri oli latausjännite?
c) Kuinka monta sekuntia lataus kesti?
d) Laske kondensaattorista saatu suurin sähkövirta.

3-10. Kondensaattoria ladattiin eri jännitteillä. Latauksen jälkeen määritettiin kondensaattorin varaus kondensaattorin purkausvirran avulla. Saadut mittaustulokset ovat taulukossa.

U/V	*Q*/nC
1,4	0,6
2,3	1,0
3,0	1,4
4,9	2,2
6,2	2,8
7,8	3,5

a) Määritä kondensaattorin kapasitanssi graafisesti mittaustuloksista.
b) Mikä on tämän kondensaattorin varaus, kun sen jännite on 24 V?

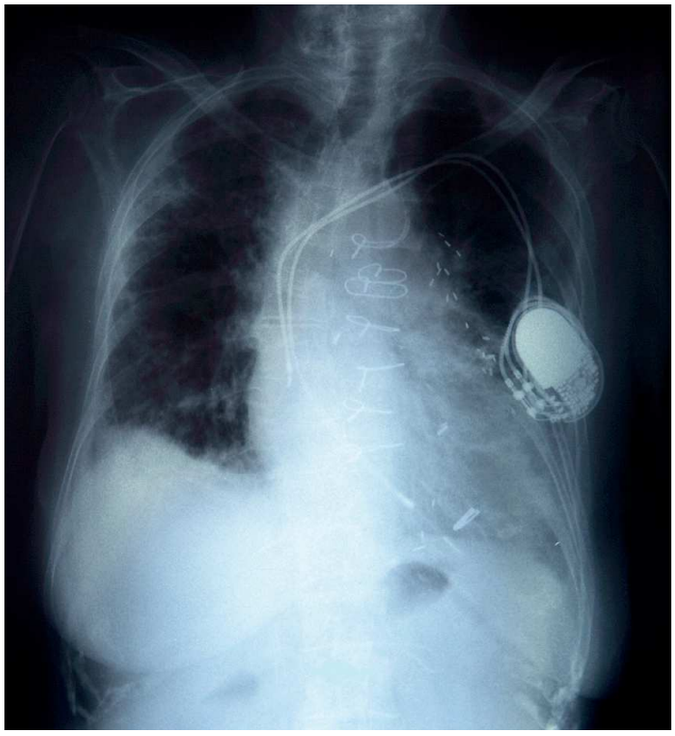
3-11. a) Kondensaattori, jonka kapasitanssi on 380 μF, on kytketty 230 V:n jännitteeseen. Laske kondensaattorin varaus.
b) Säätökondensaattorin levyjen päällekkäistä pinta-alaa voidaan muuttaa. Levyjen välinen etäisyys on 0,45 mm. Arvioi, kuinka paljon kapasitanssi muuttuu, kun levyn pinta-alan muutos on 4,5 cm^2.

3-12. Kondensaattori ($C = 120$ μF) ja vastus ($R = 330$ Ω) kytketään rinnan ja yhdistetään paristoon, jonka lähdejännite on 9,0 V. Pariston sisäinen resistanssi on 2,2 Ω.
a) Piirrä kytkentäkaavio.
b) Kuinka suuren varauksen kondensaattori saa?

3-13. a) Levykondensaattorin kapasitanssi on 350 μF ja levyjen välinen jännite 230 V. Kuinka paljon kondensaattorin varaus muuttuu, kun jännite pienenee 110 V:iin?
b) Levykondensaattorin levyn pinta-ala on 450 cm^2 ja levyjen välimatka 1,00 mm. Kondensaattori varataan 780 V:n jännitteellä. Sen varaukseksi tulee mittauksen perusteella 290 nC. Laske levyjen välissä olevan eristeen permittiivisyys.

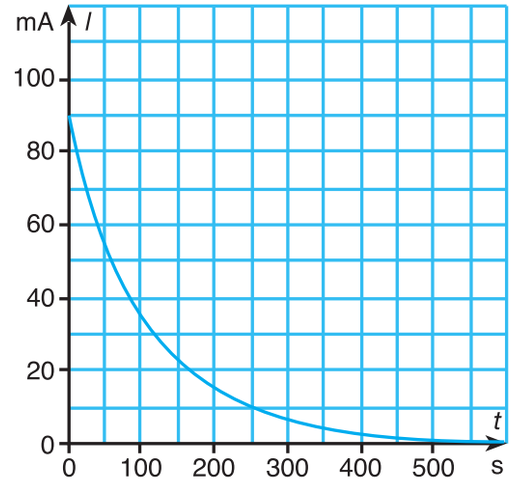
3-14. a) Demonstraatiokondensaattorin kapasitanssi on 1,0 nF. Sen levyt ovat ilmassa 1,0 cm:n päässä toisistaan. Laske kondensaattorin levyn pinta-ala.
b) Ilmassa olevan levykondensaattorin levyjen väliin pannaan eriste, jonka suhteellinen permittiivisyys on kuusinkertainen ilman permittiivisyyteen verrattuna. Levyjen väliä pienennetään puoleen alkuperäisestä. Kuinka moninkertaiseksi kapasitanssi muuttuu?

3-15. a) Sydämen toiminta on sähköisten tapahtumien ohjaamaa. Millaisissa tilanteissa tarvitaan sydämentahdistinta?
b) Sydämentahdistimessa on kondensaattori, joka latautuu 5,0 V:n jännitteeseen pariston avulla. Kun kondensaattori purkautuu kokonaan, syntyvä sähköinen pulssi aiheuttaa sydänlihasten supistumista: ne supistuvat 60 kertaa minuutissa. Kondensaattorin kapasitanssi on 10 μF ja paristoon varastoitu varaus 2,5 Ah. Kuinka usein paristo pitää vaihtaa?
c) Miten pariston lähdejännite muuttuu, kun paristo kuluu?

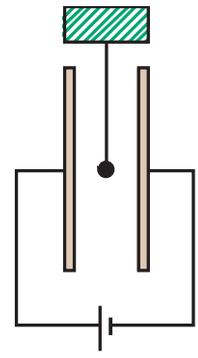


3-16. Pilvi on 850 m:n korkeudella maasta, ja sen pinta-ala on 1,00 km^2. Ajatellaan, että pilvi ja maa muodostavat kondensaattorin, jonka levyjen välisen sähkökentän voimakkuus on 3,5 kV/m. Laske
a) pilven ja maanpinnan välinen jännite
b) pilven varaus.

3-17. Uudentyyppisen ”superkondensaattorin” kapasitanssi määritettiin antamalla sen purkautua 12,0 Ω:n vastuksen kautta. Tällöin vastuksen läpi kulkeva sähkövirta muuttui oheisen kuvaajan mukaisesti. Kuinka suuri on kondensaattorin kapasitanssi? [S2005, 13]



3-18. Kondensaattorilevyjen keskellä riippuu oheisen kuvan mukaisesti pieni varattu pallo (massa 1,2 g, varaus +5,0 nC). Levyjen välinen etäisyys on 4,0 mm ja levyjen pinta-ala 1,0 m^2.
a) Millaisen kulman pallon naru muodostaa pystyakselin kanssa, kun kondensaattori varataan 180 V:n jännitteellä?
b) Jännitelähde irrotetaan ja negatiivisesti varattua levyä siirretään oikealle 2,0 mm. Millaisen kulman pallon naru nyt muodostaa pystyakselin kanssa?



3.3 Kondensaattorin energia

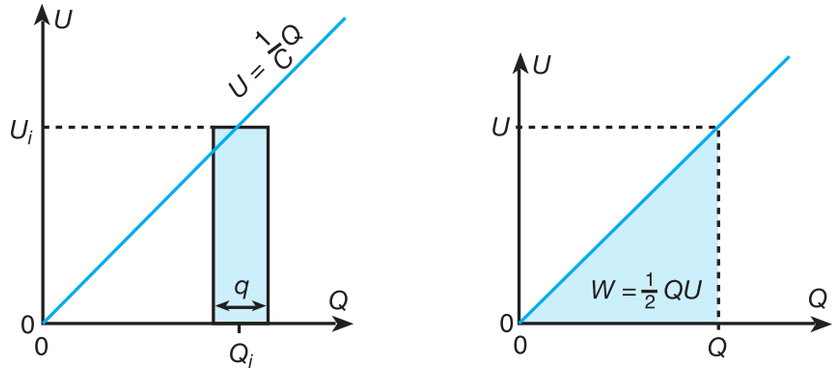
Kondensaattorin sähkökenttään varastoitunut energia vapautuu salamavalojen välähtäessä. Kondensaattori ladataan välähdyksen jälkeen laitteen pariston avulla.

Oppilastyö ▪ Salamalaitteen kondensaattori

Ota salamalaitteella varustettu kamera tai erillinen salamalaite. Yritä saada salamalaite välähtämään nopeasti useita kertoja peräkkäin. Jos mahdollista, kokeile erilaisiin salamalaitteisiin sekä uusia että lähes loppuun kulutettuja paristoja. Miksi salaman uudelleen väläyttäminen vaatii eri tapauksissa erilaisen aikavälin? Mistä seikoista tämä aikaväli riippuu?

Kondensaattori voidaan varata jännitelähteen avulla. Jännitelähteestä siirtyy kondensaattoriin elektroneja, joiden varaus q on alkeisvarauksen e suuruinen. Kondensaattoria varattaessa joudutaan tekemään työtä, koska levyillä jo olevat varaukset vastustavat uusien varausten tuontia.

Oletetaan, että varaus Q_i on jo siirretty levystä toiseen, jolloin kondensaattorin levyjen välinen jännite on $U_i = \frac{Q_i}{C}$. Kun nyt siirretään negatiivinen varaus q positiivisesta levystä negatiiviseen, tehdään työ $W_i = qU_i$, jota (Q, U)-koordinaatistossa esittää suorakulmion fysikaalinen pinta-ala.



Jännitteen kasvaessa myös varauksen siirtämiseen tarvittava työ kasvaa. Koko varauksen Q siirtämiseen tarvittava työ saadaan vastaavanlaisten suorakulmioiden fysikaalisten pinta-alojen summana: $W = \frac{1}{2}QU$, jossa U on varausta Q vastaava jännite.

Kondensaattoria ladattaessa **tehty työ varastoituu** metallilevyjen varattujen hiukkasten potentiaalienergiaksi eli **kondensaattorin energiaksi**. Se on yhtä suuri kuin on suoran $U = \frac{1}{C}Q$ ja Q-akselin väliin jäävän kolmion fysikaalinen pinta-ala.

Kondensaattorin energia
Varatun kondensaattorin energia on

$$E = \frac{1}{2}QU,$$

jossa Q on kondensaattorin sähkövaraus ja U kondensaattorin jännite.

Kondensaattorin energia voidaan esittää muodoissa

$$E = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}CU^2.$$

Kondensaattoreita voidaan käyttää myös kiihtyvyyksien mittaamiseen.

Esimerkki 4

Ambulanssin defibrillaattorin kondensaattorin kapasitanssi on 65 μF ja jännite 5,0 kV.
a) Kuinka moneen elvytysyritykseen kondensaattorin yksi varauskerta korkeintaan riittää, kun yhdessä elvytysyrityksessä käytetään keskimäärin 250 J energiaa?
b) Kuinka monta elvytysyritystä voidaan tehdä, jos kondensaattorin jännite on alentunut puoleen edellä mainitusta jännitteestä?

$C = 65\ \mu\text{F}, \quad U_1 = 5{,}0\ \text{kV}, \quad E = 250\ \text{J}, \quad U_2 = U_1/2$

a) Kondensaattorin energia ennen elvytysyrityksiä on

$$E_1 = \frac{1}{2}CU_1^2 = \frac{1}{2}\cdot 65\cdot 10^{-6}\ \text{F}\cdot(5{,}0\cdot 10^3\ \text{V})^2 = 812{,}5\ \text{J}.$$

Defibrillaattorilla voidaan tehdä $\dfrac{812{,}5\ \text{J}}{250\ \text{J}} \approx 3$ elvytysyritystä, joiden jälkeen kondensaattori on ladattava uudestaan.

Kondensaattorin varaus riittää kolmeen elvytysyritykseen.

b) Kondensaattorin energia on

$$E_2 = \frac{1}{2}CU_2^2 = \frac{1}{2}C\left(\frac{U_1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}\cdot\frac{1}{2}CU_1^2$$
$$= \frac{1}{4}E_1 = \frac{1}{4}\cdot 812{,}5\ \text{J} \approx 200\ \text{J} < 250\ \text{J}.$$

Defibrillaattorilla ei voida tehdä yhtään elvytysyritystä.

Onnettomuustapauksissa tai sairauskohtauksissa pysähtynyt sydän voidaan yrittää elvyttää asettamalla rintakehälle elektrodit, joihin kytketään lyhyeksi ajaksi jännite. Sydämen toiminta perustuu osaksi elimistön omaan sähköiseen järjestelmään. Siksi sähköisku voi vaikuttaa niin, että pysähtynyt sydän lähtee sykkimään. Kannettavissa elvytyslaitteissa, defibrillaattoreissa, sähköiskuihin tarvittava energia saadaan purkamalla kondensaattorin varaus.

Tehtäviä

3-19. Valaistusjärjestelmässä olevan kondensaattorin kapasitanssi on 120 μF. Kondensaattorin jännite on 230 V.
a) Laske kondensaattorin energia.
b) Päättele, kuinka paljon kondensaattorin energia muuttuu, kun jännite pienenee puoleen.

3-20. Kondensaattorin kapasitanssi on 3,3 μF ja varaus 0,82 mC. Kuinka paljon tarvitaan energiaa, kun varaus halutaan korottaa 1,5 mC:iin?

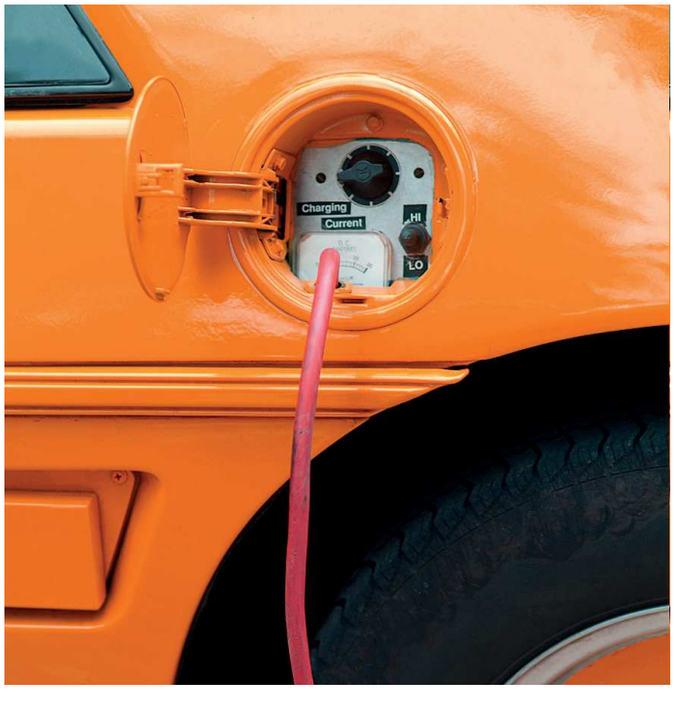
3-21. Kondensaattoriin, jonka kapasitanssi on 620 pF, on varastoitu energiaa 7,0 μJ. Laske kondensaattorin jännite.

3-22. a) Levykondensaattoriin varastoitu energia on E, kun jännite on U. Levyjen väli pienennetään puoleen ja jännite kasvatetaan kaksinkertaiseksi. Kuinka suuri kondensaattorin energia on nyt?
b) Levykondensaattorin energia on 160 μJ. Sen levyjen välinen jännite on 390 V. Laske kondensaattorin kapasitanssi.

3-23. Fysiikan työkurssilla levykondensaattori varattiin 24 V:n jännitteellä. Jännite pidettiin vakiona. Kun kondensaattorin levyjen välissä oli ilmaa, sen kapasitanssi oli 12 pF. Laske
a) kondensaattorin energia
b) kondensaattorin energia, kun sen levyjen väli täytetään paperilla, jonka suhteellinen permittiivisyys on 5,0.

3-24. Levykondensaattorin energia on 12 mJ, kun jännite on 110 V. Levyjen välistä etäisyyttä lisätään niin paljon, että jännite kasvaa 120 V. Laske kondensaattorin energia.

3-25. a) Kuinka paljon energiaa enintään voidaan varastoida kondensaattoriin, jossa on valmistajan merkinnät 2,0 μF/340 V?
b) Mitä kondensaattorille tapahtuu, jos se kytketään suurempaan jännitteeseen kuin 340 V?
c) Eristeaineiden läpilyöntikestävyyksiä löytyy mm. taulukkokirjasta. Mitä voit päätellä siitä, että läpilyöntikestävyydet ilmoitetaan yksikössä kV/mm?

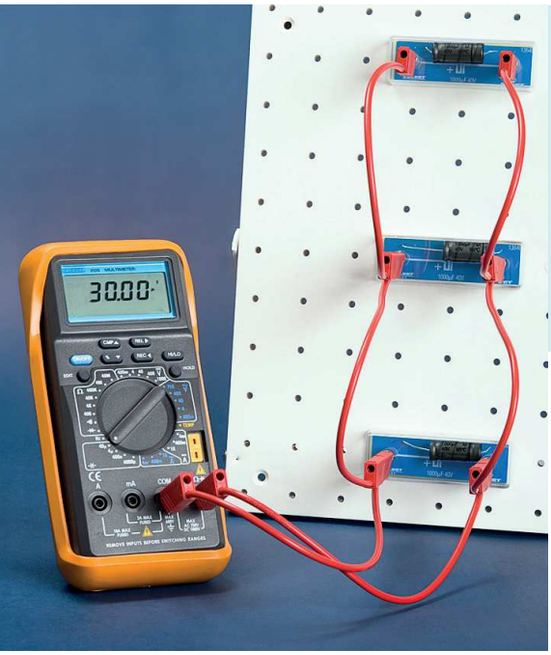


Tulevaisuuden auto saattaa olla sähköauto. Jo nyt tutkitaan, voisiko auton akun korvata superkondensaattoreilla. Kondensaattorien etuna olisi pieni koko akkuun verrattuna. Niitä voi myös ladata rajattoman monta kertaa. Perehdy sähköauton ominaisuuksiin ja liikenteen ympäristölle aiheuttamiin haittoihin.

3.4 Kondensaattorien kytkennät

Sähköpiireissä tarvitaan usein sen suuruisia kondensaattoreita, joita ei ole saatavana valmiina. Tällöin voidaan käyttää säädettäviä kondensaattoreita tai kondensaattorien yhdistelmiä. Erilaisia yhdistelmiä saadaan kytkemällä kondensaattoreita sarjaan ja rinnan.

Kondensaattorien rinnankytkentä

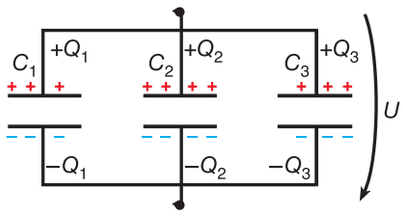


Oppilastyö ▪ Rinnankytkentä
Mittaa yleismittarilla tai kapasitanssimittarilla kolmen erillisen kondensaattorin kapasitanssit. Kytke kaksi kondensaattoria rinnan ja mittaa yhdistelmän kapasitanssi. Vertaa yhdistelmän kapasitanssia yksittäisten kondensaattorien kapasitansseihin. Toista koe kytkemällä kolme kondensaattoria rinnan.

Oppilastyössä kaikkien kolmen yksittäisen kondensaattorin kapasitanssin mitattu arvo on 10 μF. Rinnan kytketyn kondensaattoriyhdistelmän kapasitanssin mitattu arvo on 30 μF. Oppilastyössä havaitaan, että kondensaattorien rinnankytkennässä kondensaattoriyhdistelmän **kokonaiskapasitanssi** on mittaustarkkuuden rajoissa yksittäisten **kondensaattorien kapasitanssien summa**.

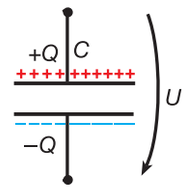
Kondensaattorit, joiden kapasitanssit ovat C_1, C_2 ja C_3, kytketään jännitteeseen U. Kondensaattorien toiset levyt kytketään positiiviseen ja toiset levyt negatiiviseen napaan. Rinnankytkennässä jokainen kondensaattori saa yhtä suuren jännitteen U. Rinnan kytkettyjen kondensaattorien varaukset ovat $Q_1 = C_1U$, $Q_2 = C_2U$ ja $Q_3 = C_3U$. Korvaavan kondensaattorin varaus on $Q = CU$.

a)



Kolmen kondensaattorin rinnankytkentä.

b)



Korvaava kondensaattori.

Koska kondensaattoriyhdistelmän saama varaus jakautuu kondensaattorien kesken, korvaavan kondensaattorin varaus on $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$. Korvaavan kondensaattorin kapasitanssiksi saadaan

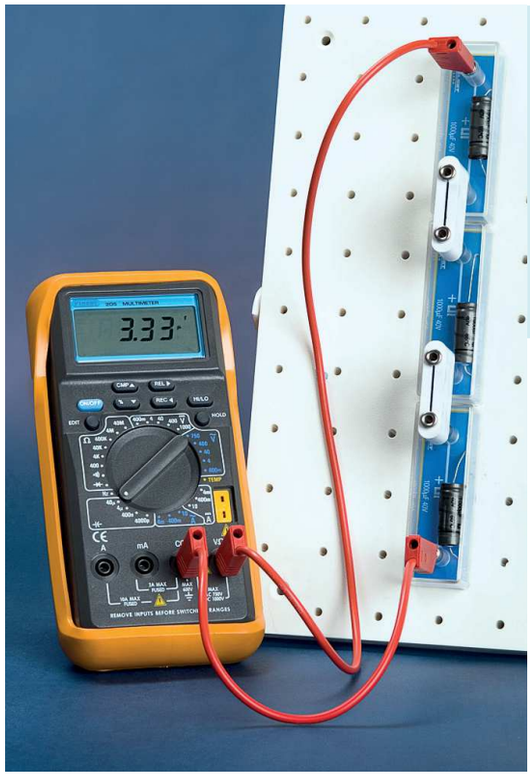
$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{U} = \frac{C_1U + C_2U + C_3U}{U} = C_1 + C_2 + C_3.$$

Kondensaattorien rinnankytkennän yleisessä tapauksessa kondensaattoriyhdistelmän kokonaiskapasitanssi saadaan laskemalla yhteen yksittäisten kondensaattorien kapasitanssit.

Kondensaattorien rinnankytkentä
Kondensaattorien rinnankytkennässä korvaavan kondensaattorin varaus on yhtä suuri kuin yksittäisten kondensaattorien varausten summa ja jokaisen kondensaattorin jännite on sama.
Rinnan kytkettyjen kondensaattorien kokonaiskapasitanssi C on

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n = \sum C_i.$$

Kondensaattorien sarjakytkentä

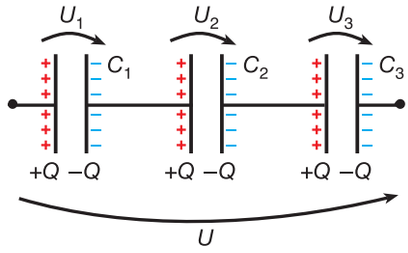


Oppilastyö ▪ Sarjakytkentä
Mittaa kolmen erillisen kondensaattorin kapasitanssit. Kytke kaksi kondensaattoria sarjaan ja mittaa kondensaattoriyhdistelmän kapasitanssi. Vertaa yhdistelmän kapasitanssia yksittäisten kondensaattorien kapasitansseihin. Toista koe kytkemällä kolme kondensaattoria sarjaan.

Oppilastyössä kaikkien kolmen yksittäisen kondensaattorin kapasitanssin mitattu arvo on 10 μF. Sarjaan kytketyn kondensaattoriyhdistelmän kapasitanssin mitattu arvo on noin 3,3 μF. Oppilastyössä havaitaan, että kondensaattorien sarjakytkennässä kondensaattoriyhdistelmän kokonaiskapasitanssi on **pienempi** kuin yksittäisten kondensaattorien kapasitanssi.

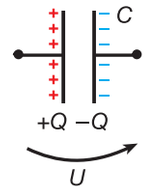
Sarjaan kytketyt kondensaattorit, joiden kapasitanssit ovat C_1, C_2 ja C_3, yhdistetään jännitteeseen U. Yhdistelmän äärimmäisten levyjen varauksiksi tulevat $+Q$ ja $-Q$. Välissä olevissa johdelevyissä tapahtuu sähköinen influenssi. Nekin saavat varaukset $+Q$ tai $-Q$. Näin ollen sarjakytkennässä **jokaisen kondensaattorin varaus on yhtä suuri kuin koko kondensaattoriyhdistelmän varaus** eli Q. Merkitään korvaavan kondensaattorin kapasitanssia symbolilla C.

a)



Kolmen kondensaattorin sarjakytkentä.

b)



Korvaava kondensaattori.

Sarjaan kytkettyjen kondensaattorien jännitteet ovat $U_1 = \frac{Q}{C_1}$, $U_2 = \frac{Q}{C_2}$ ja $U_3 = \frac{Q}{C_3}$. Sarjakytkennässä korvaavan kondensaattorin jännite $U = \frac{Q}{C}$ on yhtä suuri kuin kondensaattorien jännitteiden summa eli $U = U_1 + U_2 + U_3$. Saadaan yhtälö $\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$, josta varaus Q supistuu. Sarjakytkennän ja sen korvaavan kondensaattorin kapasitansseille saadaan yhtälö $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$.

Kondensaattorien sarjakytkennässä yhdistelmän kokonaiskapasitanssin käänteisluku saadaan laskemalla yhteen yksittäisten kondensaattorien kapasitanssien käänteisluku.

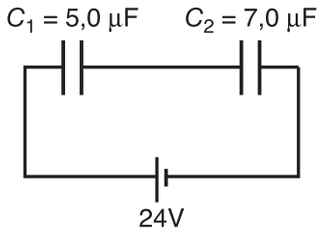
Kondensaattorien sarjakytkentä

Kondensaattorien sarjakytkennässä jokaisella kondensaattorilla on yhtä suuri varaus mutta eri suuri jännite.

Sarjaan kytkettyjen kondensaattorien kokonaiskapasitanssi C on

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_n} = \sum \frac{1}{C_i}.$$

Esimerkki 5



Laske kuvan kytkennästä kondensaattorien
a) sähkövaraukset b) jännitteet.

$C_1 = 5{,}0\ \mu\text{F}, \quad C_2 = 7{,}0\ \mu\text{F}, \quad U = 24\ \text{V}$

a) Sarjakytkettyjen kondensaattorien kapasitanssin yhtälö $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ saadaan muotoon $\frac{1}{C} = \frac{C_2}{C_1C_2} + \frac{C_1}{C_1C_2}$ ja $\frac{1}{C} = \frac{C_1 + C_2}{C_1C_2}$, josta yhdistelmän kapasitanssiksi saadaan

$$C = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2} = \frac{5{,}0\ \mu\text{F} \cdot 7{,}0\ \mu\text{F}}{5{,}0\ \mu\text{F} + 7{,}0\ \mu\text{F}} \approx 2{,}91667\ \mu\text{F}.$$

Sarjakytkennässä kondensaattoriyhdistelmän sähkövaraus $Q = CU = 2{,}91667\ \mu\text{F} \cdot 24\ \text{V} = 70{,}0001\ \mu\text{C} \approx 70\ \mu\text{C}$ on yhtä suuri kuin kunkin yksittäisen kondensaattorin sähkövaraus.

Kummankin kondensaattorin sähkövaraus on 70 µC.

b) Yksittäisten kondensaattorien jännitteet ovat

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{70{,}0001\ \mu\text{C}}{5{,}0\ \mu\text{F}} \approx 14\ \text{V} \quad \text{ja}$$

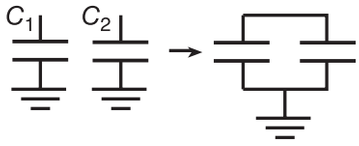
$$U_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{70{,}0001\ \mu\text{C}}{7{,}0\ \mu\text{F}} \approx 10\ \text{V}.$$

Kondensaattorien jännitteet ovat 14 V ja 10 V.

Esimerkki 6

Kondensaattori 1, jonka kapasitanssi on 9,0 µF, varataan 95 V:n jännitteeseen ja kondensaattori 2, jonka kapasitanssi on 12 µF, varataan 65 V:n jännitteeseen. Varaamisen jälkeen kondensaattorien samanmerkkiset levyt yhdistetään.
a) Laske kondensaattorien sähkövaraukset ennen levyjen yhdistämistä.
b) Mihin suuntaan elektronit liikkuvat yhdistämisen jälkeen?
c) Laske kondensaattorien jännite yhdistämisen jälkeen.
d) Laske siirtyvän sähkövarauksen suuruus.

$C_1 = 9{,}0\ \mu\text{F}, \quad C_2 = 12\ \mu\text{F}, \quad U_1 = 95\ \text{V}, \quad U_2 = 65\ \text{V}$



a) Ennen levyjen yhdistämistä kondensaattorin 1 sähkövaraus on

$$Q_1 = C_1 U_1 = 9{,}0\ \mu\text{F} \cdot 95\ \text{V} \approx 0{,}86\ \text{mC}$$

ja kondensaattorin 2 sähkövaraus on

$$Q_2 = C_2 U_2 = 12\ \mu\text{F} \cdot 65\ \text{V} \approx 0{,}78\ \text{mC}.$$

Sähkövaraukset ovat 0,86 mC ja 0,78 mC.

b) Kun levyt yhdistetään, elektronit siirtyvät alemmasta potentiaalista korkeampaan eli kondensaattorista 2 kondensaattoriin 1, kunnes kummankin kondensaattorin jännite on sama eli saavutetaan tasapaino. Huomaa, että elektronit siirtyvät sähkökentän suuntaan nähden vastakkaiseen suuntaan.

c) Rinnankytkennässä kondensaattoriyhdistelmän varaus Q on yhtä suuri kuin kondensaattorien 1 ja 2 varausten summa, joten

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 = C_1 U_1 + C_2 U_2 = 9{,}0\ \mu\text{F} \cdot 95\ \text{V} + 12\ \mu\text{F} \cdot 65\ \text{V} \\ &= 1{,}635\ \text{mC}. \end{aligned}$$

Kondensaattorien 1 ja 2 kapasitanssi rinnankytkennässä on

$$C = C_1 + C_2 = 9{,}0\ \mu\text{F} + 12\ \mu\text{F} = 21\ \mu\text{F}.$$

Levyjen yhdistämisen jälkeen rinnan kytkettyjen kondensaattorien jännite on yhtä suuri kuin kondensaattoriyhdistelmän jännite:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{1{,}635\ \text{mC}}{21\ \mu\text{F}} = 77{,}8571\ \text{V} \approx 78\ \text{V}.$$

Kummankin kondensaattorin jännite on 78 V.

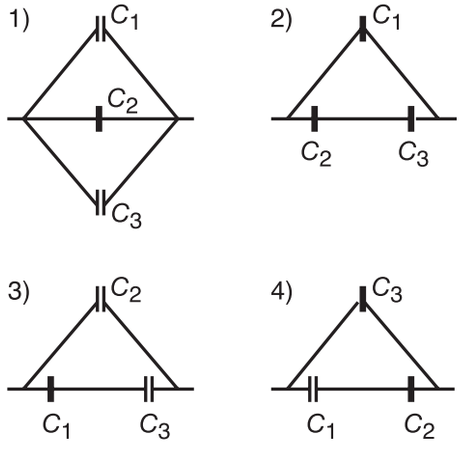
d) Varauksen muutos kondensaattorissa 2 on

$$\begin{aligned} \Delta Q &= C_2 U - C_2 U_2 = 12\ \mu\text{F} \cdot 77{,}8571\ \text{V} - 12\ \mu\text{F} \cdot 65\ \text{V} \\ &\approx 150\ \mu\text{C}. \end{aligned}$$

Kondensaattorin 2 varaus on siis kasvanut 150 μC, joten kondensaattorista 2 on siirtynyt kondensaattoriin 1 varaus −150 μC.

Tehtäviä

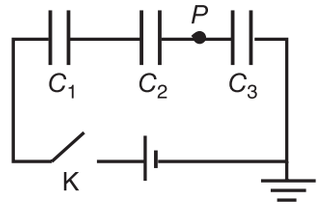
3-26. Kolme kondensaattoria ($C_1 = 0{,}50\ \mu F$, $C_2 = 1{,}0\ \mu F$ ja $C_3 = 2{,}0\ \mu F$) kytketään yhteen. Millä seuraavista kytkennöistä on pienin kokonaiskapasitanssi?



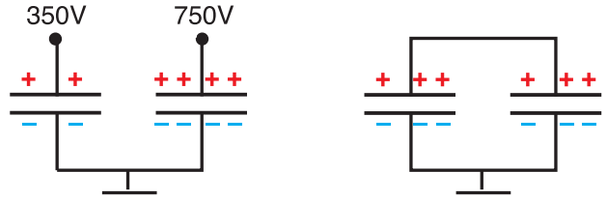
3-27. Eräässä kytkennässä tarvitaan kondensaattoria, jonka kapasitanssi on 5,0 pF. Käytettävissä on kuitenkin vain kaksi 8,0 pF:n kondensaattoria ja yksi 6,0 pF:n kondensaattori. Kuinka näitä komponentteja käyttämällä saat kondensaattorikytkennän, jonka kapasitanssi on likimain 5,0 pF?

3-28. Kolme kondensaattoria, joiden kapasitanssit ovat 0,50 pF, 0,25 pF ja 0,20 pF, kytketään
a) sarjaan b) rinnan.
Laske kondensaattoriyhdistelmän kapasitanssi. Yhdistelmä kytketään 120 V:n jännitteeseen. Mitkä ovat kytkennässä keskimmäisenä olevan 0,25 pF:n kondensaattorin varaus, jännite ja energia?

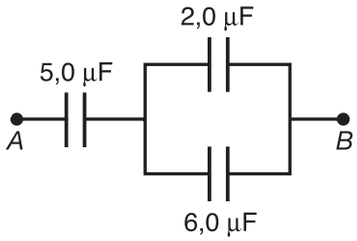
3-29. Kuvan kytkennässä kondensaattorien kapasitanssit ovat $C_1 = C_2 = 0{,}25\ \mu F$ ja $C_3 = 0{,}10\ \mu F$. Kun katkaisija K suljetaan, kondensaattori 1 saa varauksen 2,5 μC. Mikä on tällöin pisteen *P* potentiaali?



3-30. Kondensaattori, jonka kapasitanssi on 4,0 pF, varataan 350 V:n jännitteeseen. Kondensaattori, jonka kapasitanssi on 6,0 pF, varataan 750 V:n jännitteeseen. Tämän jälkeen niiden samannimiset levyt yhdistetään. Laske kondensaattorien jännitteet yhdistämisen jälkeen.

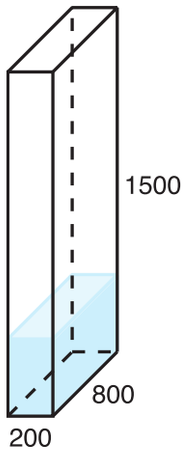


3-31. Kondensaattorit on kytketty kuvan mukaisesti. Pisteiden *A* ja *B* välille kytketään 230 V:n jännite.



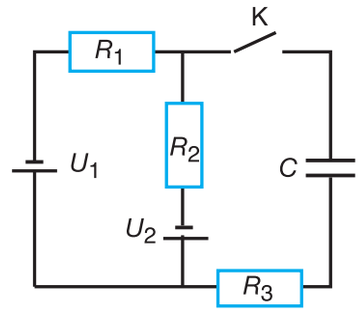
a) Laske kondensaattoriyhdistelmän kapasitanssi.
b) Laske 6,0 μF:n kondensaattorin varaus, jännite ja energia.

3-32. Muovisen öljysäiliön sisämitat ovat 200 mm × 800 mm × 1500 mm (kuvio). Säiliössä olevan öljyn määrä halutaan mitata kapasitiivisesti siten, että suuremmat vastakkaiset, pystysuorat sisäseinät päällystetään metallikalvolla, jolloin systeemiin muodostuu kondensaattori. Laske tämän kondensaattorin kapasitanssi, kun
a) säiliö on tyhjä b) säiliö on täysi
c) säiliössä on öljyä 25 % tilavuudesta.
Öljyn suhteellinen permittiivisyys on 2,2.
[K2001, 12]



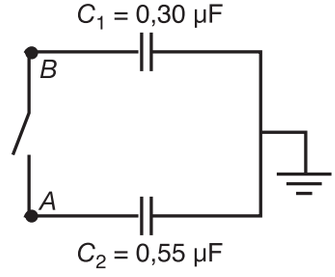
3-33. Vastus on kytketty 4,5 V:n pariston napoihin. Vastuksen rinnalle on kytketty sarjaan kaksi kondensaattoria, joiden kapasitanssit ovat 0,20 μF ja 0,48 μF. Pariston sisäinen resistanssi on 2,2 Ω ja pariston kautta kulkeva virta 0,15 A.
a) Piirrä kytkentäkaavio.
b) Kuinka suuri on vastuksen resistanssi?
c) Laske kondensaattorien varaukset.

3-34. Tarkastellaan oheista tasavirtapiiriä, jossa $U_1 = 9{,}0$ V, $U_2 = 6{,}0$ V, $R_1 = 2{,}0\ \Omega$, $R_2 = 5{,}0\ \Omega$, $R_3 = 9{,}0\ \Omega$ ja $C = 1{,}0$ μF.



a) Laske, kuinka paljon vastuksessa 2 kuluu tehoa kytkimen K ollessa avoin.
b) Laske, kuinka paljon kondensaattoriin on varastoitu energiaa, kun kytkimen K sulkemisesta on kulunut pitkä aika.

3-35. Kuvan kytkennässä pisteen *A* potentiaali on 12 V ja pisteen *B* potentiaali 28 V.
a) Mikä on pisteiden *A* ja *B* välinen jännite, kun kytkin on auki?
b) Mikä on pisteiden *A* ja *B* välinen jännite, kun kytkin on suljettu?
c) Mikä on kondensaattorin 1 varaus kytkimen sulkemisen jälkeen?



Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?
a) Kondensaattori on komponentti, joka varastoi sähkövarausta.
b) Kapasitanssin yksikkö on coulombi.
c) Tasavirta ei kulje kondensaattorin läpi.

2. Levykondensaattorin kapasitanssi
a) kasvaa kondensaattorin jännitteen kasvaessa
b) kasvaa kondensaattorin varauksen kasvaessa
c) on aina vakio tietylle kondensaattorille.

3. Kondensaattorin kapasitanssi on 55 μF ja varaus 7,0 mC. Kondensaattorin jännite on
a) 7,9 mV
b) 39 V
c) 130 V.

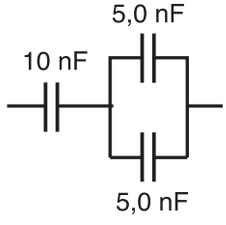
4. Levykondensaattorin kapasitanssi riippuu levyjen
a) pinta-alasta
b) paksuudesta
c) materiaalista.

5. Kondensaattorityyppejä ovat
a) säätökondensaattori
b) elektrolyyttikondensaattori
c) levykondensaattori.

6. Kondensaattori puretaan vastuksen kautta. Purkauksen jatkuessa sähkövirta
a) pienenee
b) pysyy vakiona
c) suurenee.

7. Levykondensaattorin levyjen välissä
a) voi olla ilmaa
b) eristemateriaali polarisoituu sähkökentän vaikutuksesta
c) eristemateriaalissa tapahtuu sähköinen influenssi.

8. Kuvan kytkennässä kondensaattoriyhdistelmän kokonaiskapasitanssi on
a) 2,6 nF
b) 5,0 nF
c) 12 nF.



9. Kondensaattorien sarjakytkennässä
a) jokaisen kondensaattorin varaus on yhtä suuri
b) jokaisen kondensaattorin jännite on yhtä suuri
c) kokonaiskapasitanssi kasvaa.

10. Levykondensaattori ladataan tiettyyn jännitteeseen. Kun levyjen väliin työnnetään eristelevy, kondensaattorin
a) jännite alenee
b) kapasitanssi suurenee
c) varaus purkautuu.

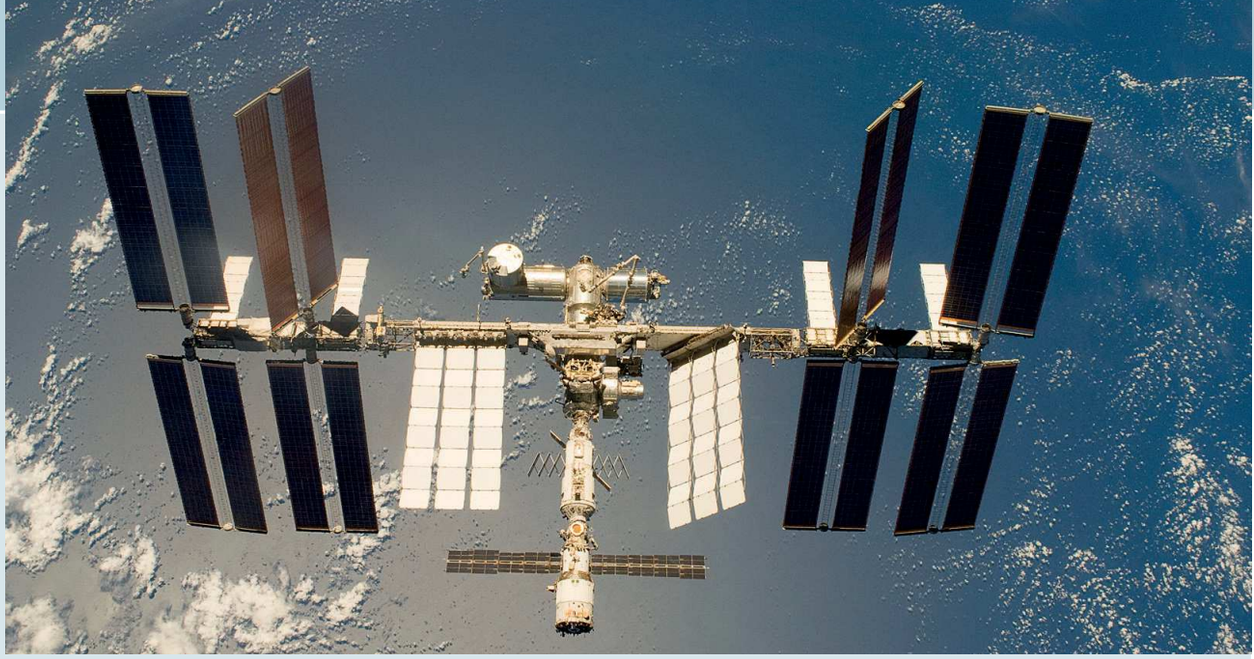
Tiivistelmä

- Kondensaattori muodostuu kahdesta johdelevystä ja niiden välissä olevasta eristemateriaalista.
- Kondensaattorin kapasitanssi on $C = \frac{Q}{U}$. Kapasitanssi kuvaa kondensaattorin sähkönvaraamiskykyä.
  Levykondensaattorin kapasitanssi riippuu levyjen pinta-alasta ja välimatkasta sekä eristemateriaalista: $C = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}$.
- Kondensaattorin energia on $E = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CU^2$.
- Kondensaattorien sarjakytkennässä jokaisen kondensaattorin varaus on sama, kokonaisjännite $U = \sum U_i$ ja kapasitansseille on yhtälö $\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_i}$.
- Kondensaattorien rinnankytkennässä jokaisen kondensaattorin jännite on sama, kokonaisvaraus $Q = \sum Q_i$ ja kapasitanssi $C = \sum C_i$.

4 Puolijohteet

Tässä luvussa opit
- yleistä puolijohteista
- diodin toimintaperiaatteen.

Keskeisiä käsitteitä ovat
- ledi
- pn-rajapinta
- kynnysjännite sekä esto- ja päästösuunta
- n- ja p-tyypin puolijohteet
- akseptori ja donori.



International Space Station.

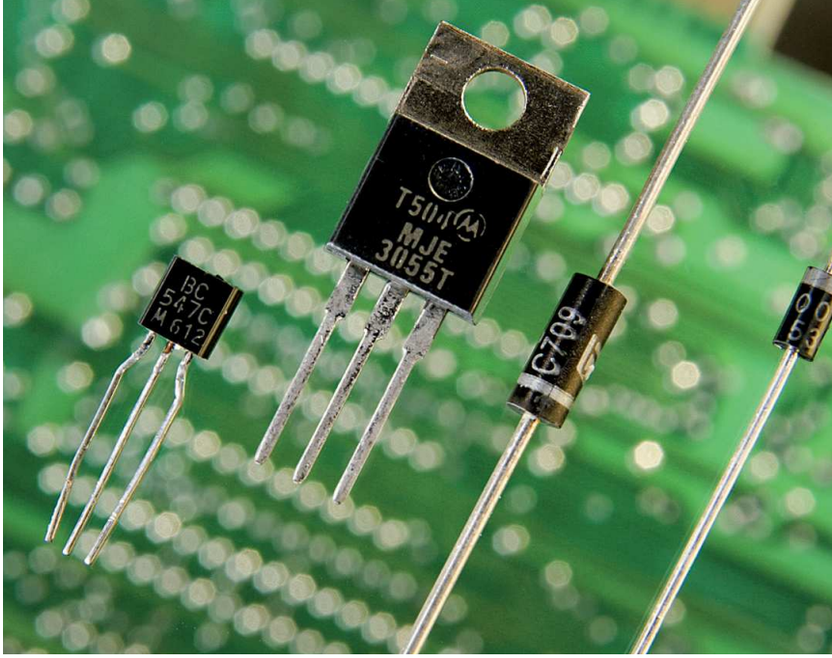
Puolijohteet elektroniikan perustana

Elektroniikan kehittyminen on vaikuttanut suuresti ihmisten elämään ja yhteiskunnan muuttumiseen. Viimeisen 50 vuoden aikana puolijohteiden merkitys on ollut suuri. Kodin elektroniikka on tullut edullisemmaksi ja luotettavammaksi puolijohteiden ansiosta, ja samalla sähkölaitteiden koko on pienentynyt. Monet jokapäiväisessä elämässä hyödylliset laitteet, kuten kännykät, mikroaaltouunit, kaukosäätimet, digitaaliset kamerat, kotitietokoneet ja GPS-paikannuslaitteet, perustuvat puolijohde-elektroniikkaan. Lääketieteessä puolijohteet ovat mahdollistaneet monet uudet kuvantamis- ja tutkimusmenetelmät.

Puolijohteet ovat tehneet mahdollisiksi myös entistä tarkemmat tieteelliset mittalaitteet. Niiden avulla pystytään mittaamaan tarkasti ilmiöitä, joita ei ennen voitu edes havaita. Tietämyksemme luonnon toiminnasta ja koko maailmankaikkeudesta on lisääntynyt räjähdysmäisesti puolijohde-elektroniikan aikakaudella.

Satelliittien kautta tapahtuva tiedonsiirto on helpottanut ja nopeuttanut tiedonvälitystä. Erityisesti tietoverkot ovat muuttaneet ihmisten elämää. Monien käytännön asioiden hoito on helpottunut, ja ihmisten väliseen yhteydenpitoon on syntynyt uusia kanavia. Esimerkiksi verkon kautta tapahtuva opiskelu on muuttanut opiskelemisen luonnetta.

Monet suunnistajat käyttävät yökilpailuissa ledilamppuja otsalamppuinaan. Ne valaisevat paremmin kuin perinteiset hehkulamput.



4.1 Puolijohteet ja puolijohdekomponentit

Aiemmin tällä kurssilla aineet jaettiin johteisiin ja eristeisiin sen mukaan, johtavatko ne sähköä vai eivät. Johteiden ja eristeiden lisäksi on olemassa kolmas aineluokka, **puolijohteet**. Puolijohteita voisi kutsua huonoiksi johteiksi, sillä ne kyllä johtavat sähköä mutta paljon huonommin kuin johteet. Niitä voisi luonnehtia myös huonoiksi eristeiksi. Puolijohteilla on monia sellaisia ominaisuuksia, joita ei ole johteilla eikä eristeillä – esimerkiksi puolijohteiden sähkönjohtokykyyn voidaan vaikuttaa. Näiden ominaisuuksien ansiosta niillä on paljon tärkeitä teknologisia sovellutuksia. Eniten käytettyjä puolijohteita ovat pii (Si), germanium (Ge) ja gallium (Ga).

Johteissa on runsaasti elektroneja, jotka voivat liikkua johteen sisällä vapaasti. Nämä vapaat elektronit kuljettavat sähkövarausta ja aiheuttavat sähkövirran, kun johde on ulkoisessa sähkökentässä. Eristeissä atomien kaikki elektronit ovat kiinnittyneinä atomeihin, joten sähkövirtaa ei voi olla. Myös puolijohteessa elektronit muodostavat atomien välisiä sidoksia, mutta osa niistä on kiinnittynyt atomeihin löysemmin kuin eristeiden elektronit. Elektroneja voi irrota atomeista esimerkiksi lämpöliikkeen seurauksena, ja ne voivat liikkua puolijohteessa vapaasti. Puolijohteen sähkönjohtokykyä voidaan parantaa seostamalla siihen pieniä määriä muita alkuaineita.

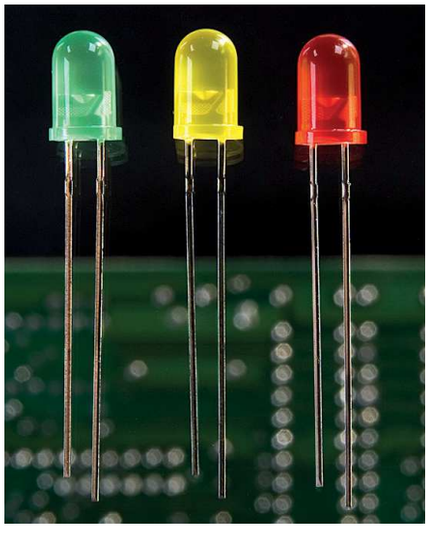
Puolijohteista valmistetut komponentit, kuten **diodit**, **transistorit** ja **mikropiirit**, ovat mahdollistaneet elektroniikan nopean kehityksen ja nykyaikaisten elektronisten laitteiden luotettavuuden. Puolijohdekomponentit ovat kooltaan pieniä, niiden tarvitsema käyttöjännite on alhainen, ja niiden käyttöikä on pitkä. Ne myös toimivat heti sähkövirran kytkemisen jälkeen, toisin kuin aiemmin käytössä olleet komponentit.

Transistorit mahdollistivat kannettavien, paristoilla toimivien ”matkaradioiden” tulon markkinoille 1960-luvun alussa. Matkaradioita kutsuttiin myös transistoriradioiksi. Nykyäänkin radioiden toiminta perustuu transistoreihin.

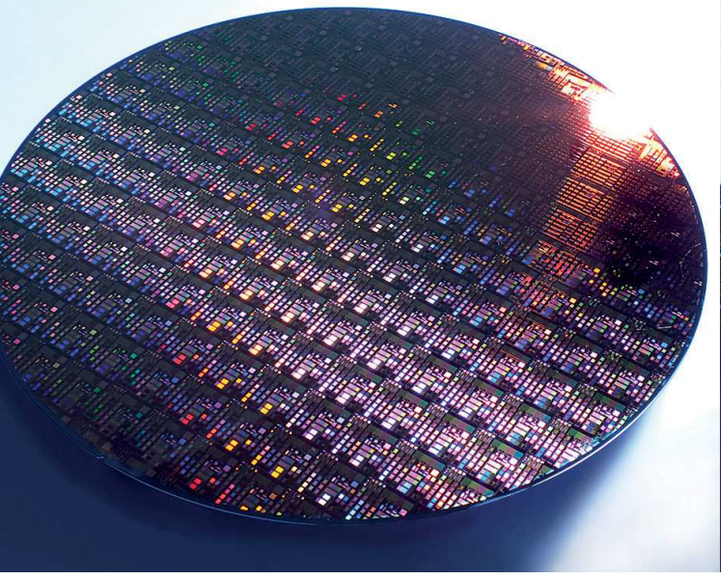
Diodi

Diodin piirrosmerkki.

Diodi on elektroniikassa yleinen komponentti. Sitä käytetään mm. vaihtojännitteen tasasuuntauksessa sekä erilaisina kytkiminä ja ilmaisimina. Tasasuuntauksessa vaihtovirta muutetaan tasavirraksi ja vaihtojännite tasajännitteeksi. Esimerkiksi kännykän ja kannettavan tietokoneen akkulaturi muuttaa sähköverkon vaihtojännitteen akun lataamiseen sopivaksi tasajännitteeksi. Diodin toiminta tasasuuntaajana perustuu siihen, että sähkövirta voi kulkea sen läpi vain yhteen suuntaan. Nykyisin käytössä olevat diodit valmistetaan puolijohteista.



Ledit eli loistediodit (*Light Emitting Diode*, LED) ovat puolijohdediodeja, jotka säteilevät valoa, kun niiden läpi johdetaan sähkövirta. Ledejä käytetään mm. sähkölaitteiden merkkivaloina, hälytysajoneuvojen vilkkuvaloissa, ulkoilmatapahtumien ja kadunvarsien videonäytöissä sekä yhä enemmän myös valaistuksessa. On myös kehitetty ledeihin perustuvia kännyköiden, televisioiden ja tietokoneiden näyttöjä (OLED-näytöt). Ledejä valmistetaan esimerkiksi galliumarsenidista (GaAs), galliumarsenidifosfidista (GaAsP) ja galliumfosfidista (GaP). Ledin valmistusmateriaali määrää ledin lähettämän valon aallonpituuden. Väri voi olla esimerkiksi keltainen, vihreä, punainen, sininen tai useamman värin yhdistelmä.

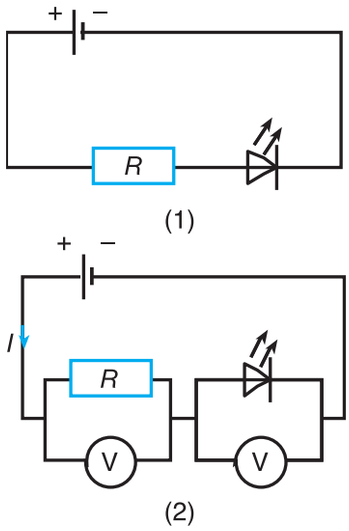


Piikiekko, johon on valmistettu satoja mikropiirejä.

Ledien käyttö valaistuksessa säästää energiaa esim. hehkulamppujen käyttöön verrattuna.

Ledin väriä voidaan muokata ledin pintaan lisätyillä kalvoilla ja pinnoitteilla. Näin voidaan saada aikaan myös valoa, jonka silmä aistii valkoisena valona.

Muita puolijohdediodeja ovat mm. zenerdiodi, jota käytetään jännitteen säätöön, sekä fotodiodi, joka on valolle herkkä diodi.



Oppilastyö ▪ Diodi

1. Kytke esimerkiksi punainen ledi ja säädettävä etuvastus sarjaan. Yhdistä ledin anodi (plusnapa) säädettävän jännitelähteen plusnapaan ja katodi (miinusnapa) säätövastukseen (kytkentä 1). Suurenna säädettävästä jännitelähteestä varovasti jännitettä. Tarkkaile lediä. Käännä kytkennässä oleva ledi toisin päin. Mitä havaitset?

2. Tee kuvan 2 mukainen kytkentä. Mittaa diodissa ja vastuksessa tapahtuvat jännitehäviöt.

Kynnysjännitteitä

Ledi	Kynnysjännite
punainen	1,6–1,7 V
vihreä	2,1–2,3 V
keltainen	1,8–2,3 V

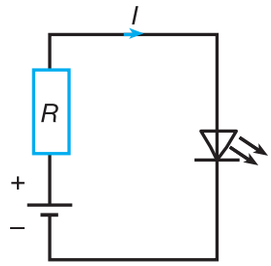
Jotta ledit valaisisivat, ne vaativat yleensä noin 10–20 mA:n sähkövirran. Usein sähkövirtaa on rajoitettava etuvastuksella.

Oppilastyön ensimmäisessä kohdassa ledin anodi kytketään jännitelähteen plusnapaan eli diodi kytketään **päästösuuntaan.** Päästösuuntaan kytketyn diodin läpi voi kulkea sähkövirta. Sähkövirta kulkee kuitenkin vasta, kun diodin päiden välinen jännite on suurempi kuin tietty minimijännite, ns. **kynnysjännite**. Oppilastyössä punaisen ledin kynnysjännite on noin 1,6 V.

Kun ledin anodi kytketään jännitelähteen miinusnapaan, diodin läpi ei kulje sähkövirtaa. Diodi on silloin kytketty **estosuuntaan**.

Esimerkki 1

Ledi kytketään päästösuuntaisesti 12 V:n tasajännitteeseen. Ledin kynnysjännite (nimellisjännite) on noin 1,7 V ja virta 18 mA.
a) Miksi kytkennässä tarvitaan etuvastus?
b) Laske etuvastuksen suuruus ja tehonkesto.



$U = 12\ \text{V}, \quad U_{\text{ledi}} = 1{,}7\ \text{V}, \quad I = 18\ \text{mA}$

a) Koska ledi kytketään kynnysjännitettään suurempaan jännitteeseen, etuvastus suojaa lediä liian suurelta jännitteeltä.

b) Etuvastuksen jännitehäviön on oltava

$$U_{\text{etu}} = 12\ \text{V} - 1{,}7\ \text{V} = 10{,}3\ \text{V}.$$

Etuvastuksen resistanssi on

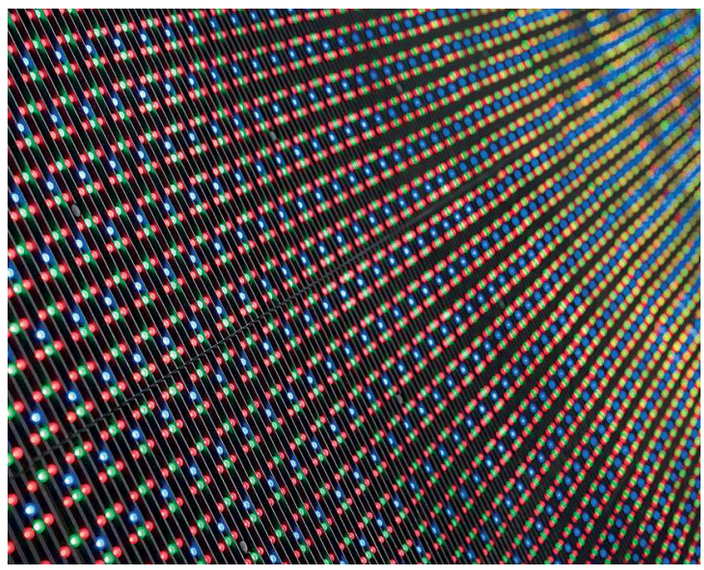
$$R = \frac{U_{\text{etu}}}{I} = \frac{10{,}3\ \text{V}}{18\ \text{mA}} \approx 570\ \Omega.$$

Etuvastuksen tehonkeston on oltava vähintään

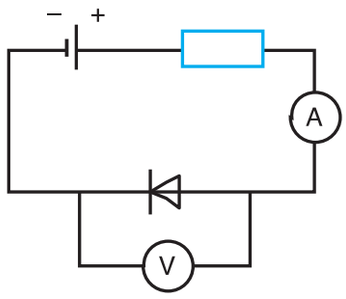
$$P = U_{\text{etu}} I = 10{,}3\ \text{V} \cdot 18\ \text{mA} \approx 0{,}19\ \text{W}.$$

Etuvastuksen resistanssi on 570 Ω ja tehonkesto vähintään 0,19 W.

Liikennevalot ja muut ledi-liikenneopastimet näkyvät selkeästi myös kirkkaassa auringonvalossa. Ledivalojen käyttöikä on pitkä, ja niiden ylläpitokustannukset ovat alhaiset. Ledejä käytetään myös autojen etu- ja takavaloissa.



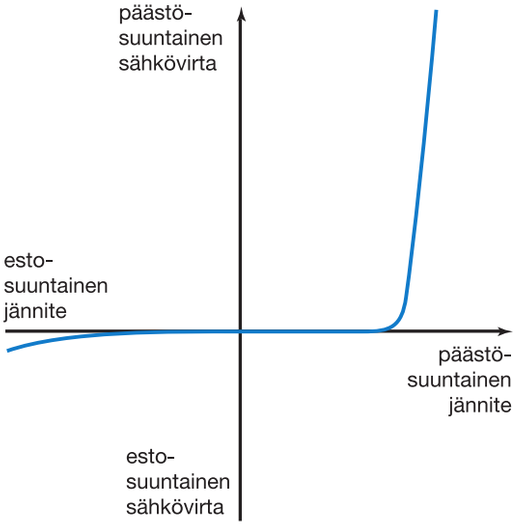
Suurissa videonäytöissä käytetään leditekniikkaa. Värit muodostetaan vihreiden, sinisten ja punaisten ledien avulla.



Oppilastyö ▪ Diodin ominaiskäyrä

1. Rakenna kuvan mukainen kytkentä, jossa diodi on kytketty päästösuuntaan. Tutki tietokonepohjaisen mittausjärjestelmän avulla, miten diodin läpi kulkeva sähkövirta riippuu diodin jännitteestä.

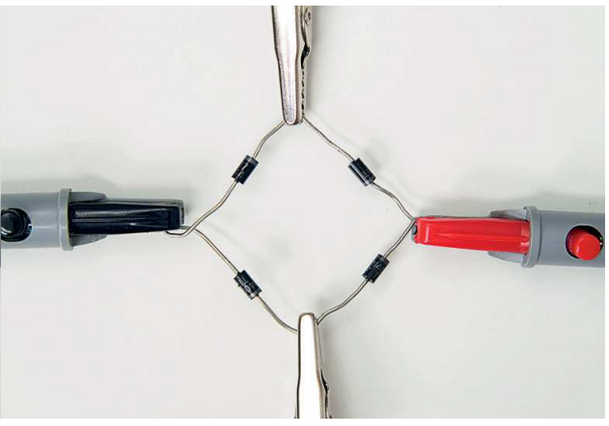
2. Käännä diodi toisin päin eli estosuuntaan ja tee vastaavat mittaukset kuin kohdassa 1.

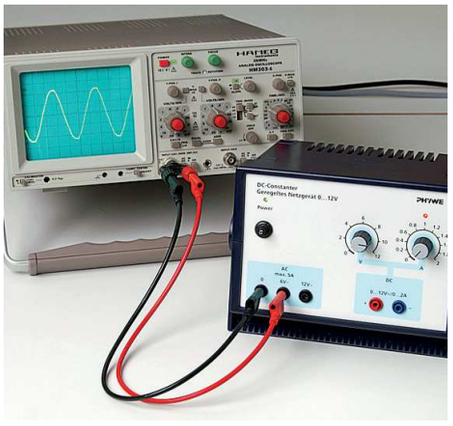


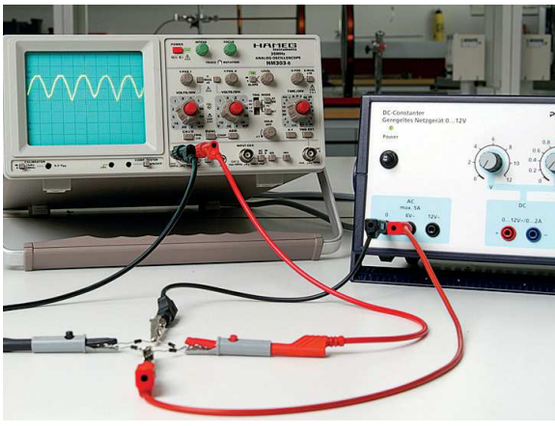
Diodin ominaiskäyrä.

Kun diodi kytketään päästösuuntaan, sähkövirta alkaa kulkea vasta, kun jännite on ylittänyt kynnysjännitteen. Tämän jälkeen virta kasvaa voimakkaasti.

Estosuuntaankin kytketyn diodin läpi kulkee pieni sähkövirta (estovirta). Sen suuruus riippuu estosuuntaisen jännitteen suuruudesta. Jos estojännite kasvaa liikaa, diodissa tapahtuu ns. läpilyönti ja diodi tuhoutuu. Läpilyöntijännite on diodista riippuen 5–1000 V.







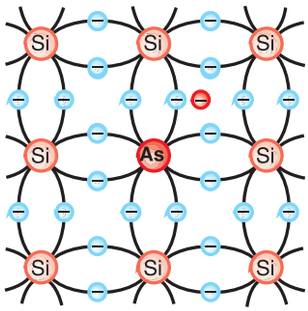
Vaihtovirran tasasuuntaus on yksi diodien tärkeimmistä käyttökohteista. Neljän diodin muodostamaa kokonaisuutta sanotaan tasasuuntaussillaksi. Sen avulla vaihtovirta voidaan muuttaa tasavirraksi. Tähän palataan tarkemmin Sähkömagnetismi-kurssilla.

4.2 p- ja n-tyypin puolijohteet

Puolijohteet johtavat puhtaina huonosti sähköä. Esimerkiksi piikiteessä atomin kaikki neljä ulkokuoren elektronia muodostavat kovalenttisen sidoksen naapuriatomien kanssa. Siksi kiteessä ei juuri ole sähkövirran vaatimia vapaita elektroneja. Vain pieni määrä elektroneja voi vapautua sidoksista esimerkiksi valon tai lämpöliikkeen vaikutuksesta.

Puolijohteen sähkönjohtokykyä voidaan parantaa **seostamalla** siihen pieniä määriä sopivasti valitun toisen aineen atomeja, ns. epäpuhtausatomeja. Tätä kutsutaan puolijohteen douppaamiseksi. Seostuksen määrä on tavallisesti luokkaa yksi epäpuhtausatomi 10^4–10^7:ää puolijohteen atomia kohti. Käytettyjä epäpuhtausatomeja on kahdenlaisia: toisissa on elektroniverhon ulkokuorella yksi elektroni enemmän kuin alkuperäisessä puolijohdeatomissa, toisissa yksi vähemmän.

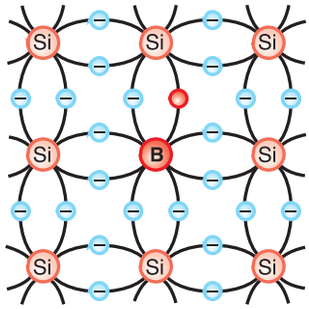
Piikiteessä epäpuhtautena oleva arseeniatomi luovuttaa kiteeseen vapaan elektronin.



Epäpuhtausatomia, jossa ulkokuorella on yksi elektroni enemmän kuin puolijohteen atomissa, kutsutaan **donoriksi** eli antajaksi. Donori luovuttaa kiteeseen ylimääräisen elektronin, jota se ei tarvitse sidoksiin puolijohdeatomien kanssa. Tämä elektroni voi toimia varauksenkuljettajana.

Donoreilla seostettua puolijohdetta kutsutaan **n-tyypin puolijohteeksi**, koska siinä varauksenkuljettajina toimivat negatiivisesti varatut elektronit. Esimerkiksi piistä saadaan n-tyypin puolijohde, kun siihen seostetaan viidennen pääryhmän alkuainetta, vaikkapa arseenia. Arseenilla on uloimmalla kuorellaan viisi elektronia, joista neljä asettuu ympäröivien piiatomien kanssa lujasti arseenin sidoksiin ja viides jää vapaaksi.

Piikiteessä epäpuhtautena oleva booriatomi luo atomisidoksiin aukon eli paikan, josta puuttuu elektroni.



Epäpuhtausatomia, jonka ulkokuorella on yksi elektroni vähemmän kuin puolijohteen atomissa, kutsutaan **akseptoriksi** eli ottajaksi. Atomien välisiin sidoksiin jää akseptorin kohdalle tyhjä paikka, aukko, josta puuttuu elektroni. Akseptori sitoo aukkoon elektronin naapuriatomista, johon puolestaan jää aukko. Tähän aukkoon voi siirtyä elektroni toisesta lähiatomista ja niin edelleen. Kiteessä kulkee silloin sähkövirta atomisidoksesta toiseen siirtyvien elektronien muodossa. Voidaan myös ajatella, että sähkövirta on aukon etenemistä kiteessä. Aukko käyttäytyy kuten positiivisesti varautunut hiukkanen ja kulkee vastakkaiseen suuntaan kuin elektronit, ts. sähkövirran suuntaan.

Akseptoreilla seostettua puolijohdetta kutsutaan **p-tyypin puolijohteeksi**, koska siinä varauksenkuljettajilla – aukoilla – on positiivinen varaus. Kun piihin seostetaan kolmannen pääryhmän alkuainetta, esimerkiksi booria, syntyy p-tyypin puolijohde. Booriatomin ja piiatomien välisiin sidoksiin jää yhteen kohtaan aukko, koska boorilla on ulkokuorellaan vain kolme elektronia. Aukko toimii sähkönkuljettajana siirtyessään sidoksesta toiseen koko kiteen läpi.

Esimerkki 2

Piikiteessä on huoneenlämpötilassa noin 10^{10} vapaata elektronia kuutiosenttimetrissä. Piitä seostetaan arseeniatomeilla suhteessa yhden suhde miljoonaan. Laske, kuinka monta vapaata elektronia kuutiosenttimetrissä on näin syntyneessä n-tyypin puolijohteessa, ja vertaa tulosta vapaiden elektronien määrään puhtaassa piikiteessä. Piin tiheys on 2,33 g/cm^3 ja moolimassa 28,1 g/mol.

$\rho_{Si} = 2{,}33\ \text{g/cm}^3, \quad M_{Si} = 28{,}1\ \text{g/mol}$

Piiatomin massa saadaan jakamalla moolimassa $M_{Si} = 28{,}1$ g/mol moolissa olevien atomien lukumäärällä eli Avogadron luvulla $N_A = 6{,}0221 \cdot 10^{23}$ atomia/mol:

$$m_{Si} = \frac{M_{Si}}{N_A} = \frac{28{,}1\ \text{g/mol}}{6{,}0221 \cdot 10^{23}\ \frac{1}{\text{mol}}} \approx 4{,}666 \cdot 10^{-23}\ \text{g}.$$

Piiatomien lukumäärä kuutiosenttimetrissä saadaan jakamalla piin tiheys $\rho_{Si} = 2{,}33$ g/cm^3 yhden piiatomin massalla:

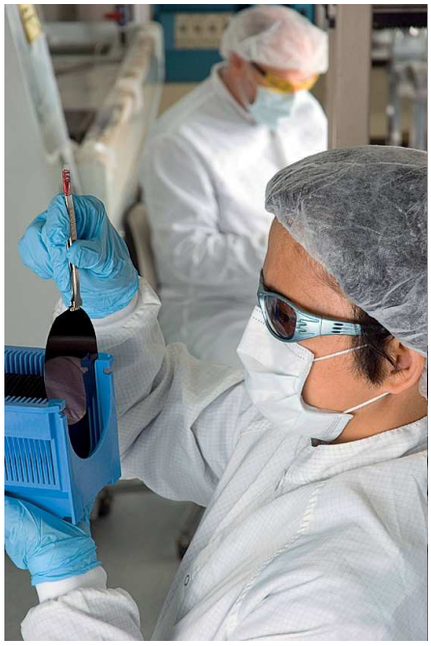
$$n_{Si} = \frac{\rho_{Si}}{m_{Si}} = \frac{2{,}33\ \text{g/cm}^3}{4{,}666 \cdot 10^{-23}\ \text{g}} \approx 4{,}99 \cdot 10^{22}\ \frac{\text{atomia}}{\text{cm}^3}.$$

Epäpuhtautena olevien arseeniatomien määrä on silloin

$$n_{As} = 10^{-6} \cdot n_{Si} = 10^{-6} \cdot 4{,}99 \cdot 10^{22}\ \text{atomia/cm}^3$$
$$\approx 5{,}0 \cdot 10^{16}\ \text{atomia/cm}^3.$$

Jokainen arseeniatomi tuo kiteeseen yhden vapaan elektronin, joten vapaiden elektronien lukumäärä kuutiosenttimetrissä on $5{,}0 \cdot 10^{16}$.

Vapaiden elektronien määrä on $5{,}0 \cdot 10^{16}$ elektronia/cm^3. Vapaita elektroneja on noin viisi miljoonaa kertaa niin paljon kuin puhtaassa piikiteessä.



Puolijohde-elektroniikan valmistamisessa on korkeat puhtausvaatimukset.

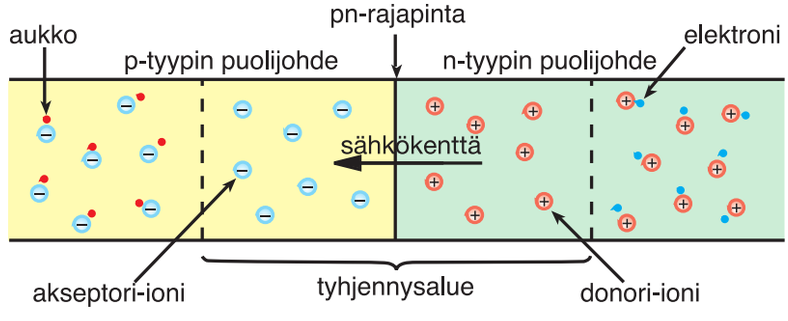
pn-puolijohdeliitos

Puolijohdekomponentteja valmistetaan yhdistämällä eri tavoin seostettuja puolijohteita toisiinsa. Kun p- ja n-tyypin puolijohdepalat liitetään toisiinsa, syntyy pn-liitos, joka on monien puolijohdekomponenttien perusosa. Diodi, jota oppilastöissä tutkittiin, on perusrakenteeltaan yksinkertainen pn-liitos.

Ennen p-tyypin puolijohteen ja n-tyypin puolijohteen diodiksi yhdistämistä molemmat ovat sähköisesti neutraaleja: p-tyypin puolijohteessa on liikkuvia aukkoja ja sama määrä kiteeseen sidottuja negatiivisia akseptori-ioneja. n-tyypin puolijohteessa on liikkuvia elektroneja ja sama määrä kiteeseen sidottuja positiivisia donori-ioneja.

Kun puolijohteet yhdistetään, liitoskohdan lähistöllä olevia p-puolen aukkoja alkaa lämpöliikkeen vaikutuksesta siirtyä rajapinnan läpi n-puolelle ja n-puolen elektroneja p-puolelle. Kun elektroni kohtaa atomisidoksessa olevan aukon, se asettuu siihen. Tätä kutsutaan **rekombinaatioksi**. Elektroni ja aukko eivät enää tämän jälkeen toimi varauksenkuljettajina. Tällä tavoin liitoskohdan läheisyyteen muodostuu alue (leveys 0,5–1 μm), jossa ei ole varauksenkuljettajia. Aluetta kutsutaan **tyhjennysalueeksi**.

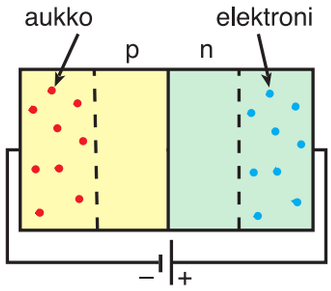
Kun vapaat elektronit ja aukot ovat hävinneet pn-liitoskohdan ympäristöstä ja tyhjennysalue on muodostunut, molemmille puolille pn-liitosta jää nettovaraus. p-puolella on akseptori-ionien aiheuttama negatiivinen varaus ja n-puolella donori-ionien aiheuttama positiivinen varaus. Ionit ovat sidottuina kiderakenteeseen, eivätkä ne liiku. Varaukset aiheuttavat sähkökentän, jonka suunta on n-tyypin puolijohteesta p-tyypin puolijohteeseen. n- ja p-puolen välistä potentiaalieroa sanotaan **kynnysjännitteeksi**.



pn-liitoksen ympäristöön syntyy tyhjennysalue, jossa ei ole varauksenkuljettajia. Kun vapaat elektronit ja aukot ovat rekombinoituneet, tyhjennysalueelle jää jäljelle negatiivisia akseptori-ioneita ja positiivisia donori-ioneita. Ne aiheuttavat n-puolelta p-puolelle suuntautuvan sähkökentän.

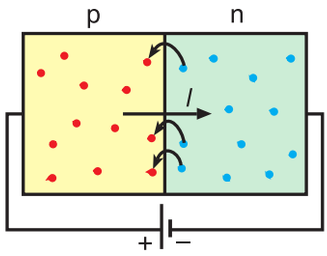
Edellä tehdyssä oppilastyössä punaisen ledin kynnysjännite oli noin 1,7 V. Sähkökenttä aiheuttaa tyhjennysalueen ulkopuolella n-alueessa oleviin elektroneihin ja p-puolella oleviin aukkoihin liitoskohdasta poispäin suuntautuvan sähköisen voiman. Tämän takia tyhjennysalueen ulkopuolella olevat varauksenkuljettajat eivät pysty siirtymään tyhjennysalueelle tai ylittämään sitä ilman lisäenergiaa.

pn-liitos ulkoiseen jännitteeseen kytkettynä



Estosuuntaan kytketyssä diodissa on leveä tyhjennysalue, jonka läpi ei kulje sähkövirtaa.

Sähkövirran kulkuun pn-liitoksen läpi voidaan vaikuttaa kytkemällä liitos ulkoiseen jännitteeseen. **Estosuuntaisessa** kytkennässä diodin p-puoli on yhdistetty jännitelähteen negatiiviseen ja n-puoli positiiviseen napaan. Jännitelähteen positiivinen napa vetää puoleensa n-alueen elektroneja ja negatiivinen napa p-alueen aukkoja. Elektronit ja aukot siirtyvät tällöin entistä kauemmas toisistaan ja pn-rajapinnasta. Tyhjennysalue levenee, ja sähkövirran kulku diodin läpi vaikeutuu entisestään. Lämpöliikkeen takia tyhjennysalueella on kuitenkin vähäinen määrä varauksenkuljettajia, jotka aiheuttavat pienen estosuuntaisen vuotovirran. Vuotovirran määrä riippuu diodin lämpötilasta.



Päästösuuntaan kytketyssä diodissa elektronit ja aukot kulkevat pn-liitoskohtaa kohti, jossa ne rekombinoituvat. Diodin läpi kulkee sähkövirta p-alueesta n-alueen suuntaan.

Diodi on kytketty **päästösuuntaan**, kun p-puoli on yhdistetty jännitelähteen positiiviseen ja n-puoli negatiiviseen napaan. Syntyvä päästösuuntainen jännite on vastakkainen tyhjennysalueella vallitsevalle kynnysjännitteelle. Kun päästösuuntainen jännite ylittää kynnysjännitteen arvon, sähkökentän suunta liitosalueella on p-alueesta n-alueeseen. Tämä sähkökenttä kuljettaa p-alueen aukkoja ja n-alueen elektroneja kohti pn-rajapintaa, jossa ne rekombinoituvat. Diodin läpi kulkee silloin sähkövirta päästösuuntaan eli p-alueesta n-alueelle. Sähkövirta kasvaa nopeasti jännitteen kasvaessa.

Oppilastyössä mitatussa diodin (ledin) ominaiskäyrässä havaittiin virran voimakas kasvu päästösuuntaisen jännitteen ylittäessä kynnysjännitteen arvon 1,7 V.

Aurinkopaneeleissa auringonvalon energiaa muutetaan aurinkokennoilla sähköksi. Lentokonekin voi saada energiansa siipiin asetetuilla aurinkopaneeleilla.

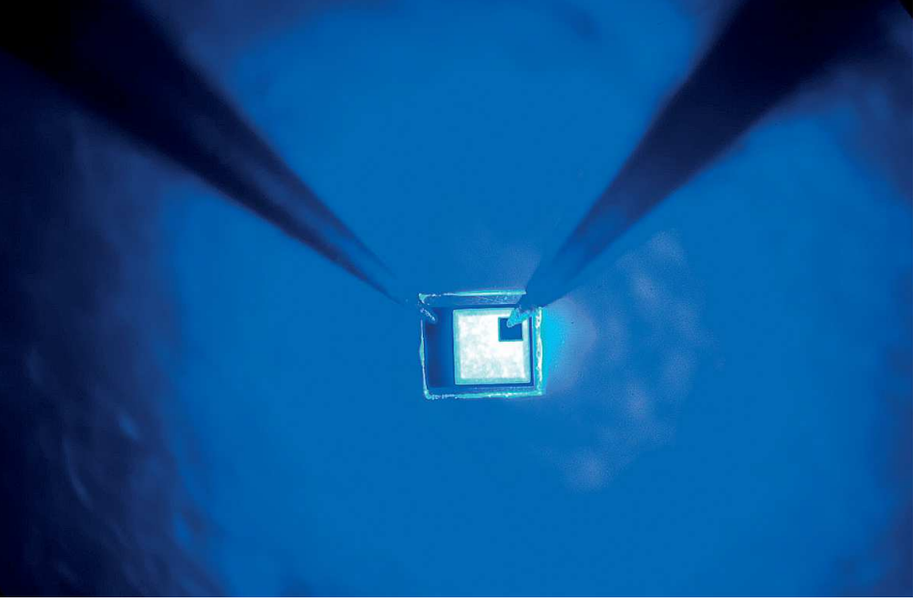
Diodi ja valo

Kun elektroni rekombinaatiossa siirtyy atomisidoksessa olevaan aukkoon, osa sen energiasta muuttuu sähkömagneettiseksi säteilyksi. Säteilyn aallonpituus riippuu aineesta, josta puolijohde on valmistettu. **Loistediodeissa** eli **ledeissä** syntyvä sähkömagneettinen säteily on näkyvän valon alueella. Oppilastyössä käytetty ledi lähetti punaista valoa.

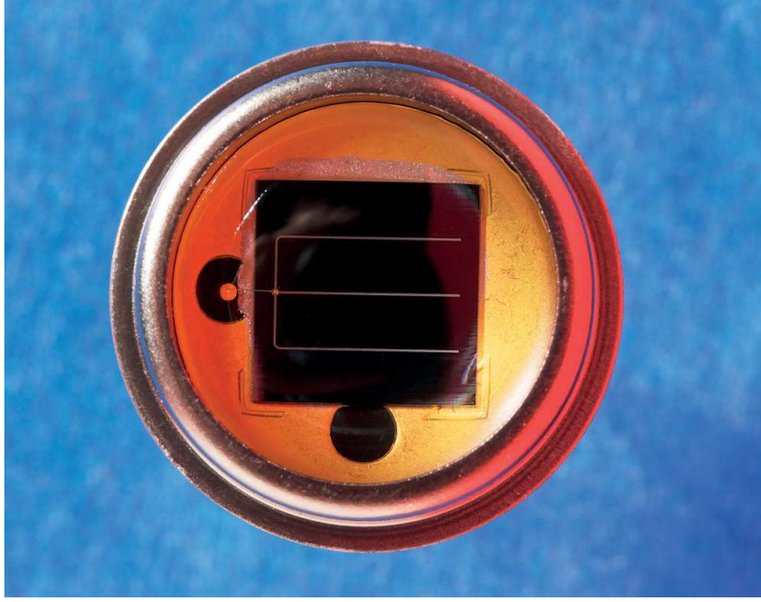
Toisaalta puolijohteeseen ulkopuolelta kohdistuva sähkömagneettinen säteily voi irrottaa elektroneja atomisidoksista, jolloin tyhjennysalueelle syntyy aukko–elektroni-pareja. Tästä aiheutuu estosuuntainen sähkövirta (estovirta) pn-liitoksen läpi. **Fotodiodissa** valon pääsyä diodin pinnalle tehostetaan pienellä linssillä. Syntyneen virran määrä on suoraan verrannollinen valon intensiteettiin. Fotodiodia käytetään esimerkiksi hipaisukoskettimissa, joissa ne aistivat valon heijastumista sormen päästä.

Kun puolijohdediodia ei ole kytketty ulkoiseen jännitteeseen, valon diodissa synnyttämät varauksenkuljettajat aiheuttavat jännitteen diodin päiden välille. Valokennojen toiminta perustuu tähän ilmiöön. Niillä tuotetaan energiaa esimerkiksi taskulaskimiin ja rannekelloihin.

Aurinkokennossa sähkömagneettisen säteilyn vaikutuksesta vapautuvat elektronit johdetaan ulkoiseen virtapiiriin ja niitä käytetään lataamaan aurinkoparistoja. Aurinkokennoista kootut aurinkopaneelit ovat merkittävä uusiutuvaan energiaan perustuva sähköntuotantomenetelmä.



Ultravioletilla led-valolla voidaan puhdistaa vettä.



Hipaisukytkimissä käytetään fotodiodeja.

Energiavyöt

Johteiden, eristeiden ja puolijohteiden erilaista kykyä johtaa sähköä havainnollistetaan aineessa olevien elektronien energioiden avulla. Yksittäisessä atomissa elektroni vuorovaikuttaa atomin ytimen kanssa ja elektronin energialla voi olla vain tietyt erilliset arvot, joita kutsutaan energiatasoiksi.

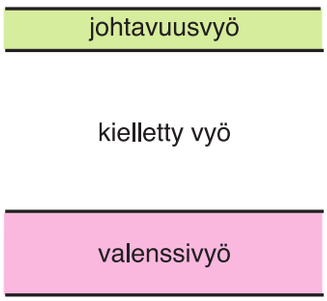
Kiinteässä aineessa, jossa atomit ovat toisiinsa sitoutuneina, elektroni kokee samanaikaisesti hyvin monen ytimen vaikutuksen. Tällöin elektronin energian mahdolliset arvot voivat olla erillisten energiatasojen sijasta laajemmilla alueilla, joita kutsutaan **energiavöiksi**. Energiavyöt koostuvat suuresta määrästä energiatasoja, joiden energiat ovat hyvin lähellä toisiaan. Energiavöiden välissä on ns. kiellettyjä energiavöitä. Aineessa ei voi olla elektroneja, joiden energia on kielletyn vyön alueella.

Energialtaan korkein, atomeihin sidottuja elektroneja sisältävä energiavyö on **valenssivyö**. Valenssivyöllä olevien elektronien avulla kiinteän aineen, kuten piin, atomit kiinnittyvät toisiinsa. **Johtavuusvyö** on valenssivyön yläpuolella olevien energiatasojen yhteisnimitys. Johtavuusvyöllä olevat elektronit pääsevät liikkumaan vapaasti. **Aine** voi siis **johtaa sähköä**, **jos sen johtavuusvyöllä on elektroneja**.

Aineen sähkönjohtavuus riippuu siitä, miten helposti elektronit voivat siirtyä valenssivyöltä johtavuusvyölle. Johteiden, puolijohteiden ja eristeiden vyörakenteet poikkeavat toisistaan, mikä selittää niiden erilaisen kyvyn johtaa sähköä.

Johteissa valenssivyö ja johtavuusvyö ovat ainakin osittain päällekkäin, jolloin osa valenssivyön alueella olevista elektroneista voi liikkua aineessa vapaasti. Eristeissä ja puolijohteissa valenssivyön ja johtavuusvyön välissä on kielletty vyö. Eristeissä kielletty vyö on leveä ja valenssivyöllä olevan elektronin tulisi saada runsaasti lisäenergiaa, jotta se voisi siirtyä kielletyn vyön yli johtavuusvyöhön. Siirtyminen tapahtuu harvoin, ja siksi eristeet eivät johda sähköä.

Johteen energiavyörakenne.

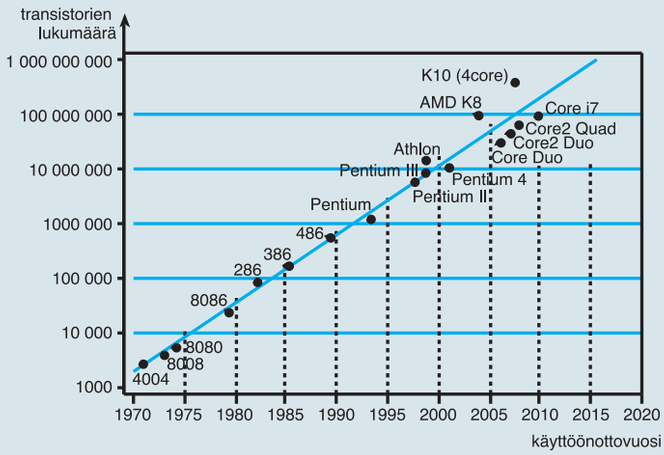


Eristeen energiavyörakenne.

Puolijohteen energiavyörakenne.

Puolijohteissa valenssivyön ja johtavuusvyön välinen kielletty vyö on kapeampi kuin eristeissä, joten puolijohteissa elektronit siirtyvät johtavuusvyölle helpommin kuin eristeissä. Puolijohteissa lämpöliike riittää antamaan elektroneille tarpeeksi lisäenergiaa johtavuusvyölle siirtymiseen. Siksi puolijohde johtaa sähköä eristettä paremmin ja sen johtavuus paranee lämpötilan noustessa. Puolijohteeseen saostetut epäpuhtaudet synnyttävät ylimääräisen sallitun energiatason valenssi- ja johtavuusvyön väliseen kiellettyyn vyöhön. Tämä tekee elektronien siirtymisen johtavuusvyölle entistä helpommaksi, mikä parantaa puolijohteen sähkönjohtavuutta.

Puolijohteiden väri määräytyy johtavuusvyön ja valenssivyön välissä olevan energia-aukon leveydestä. Tästä johtuu esimerkiksi sinertävän timantin väri. Ota selvää, mikä on Hope Diamond.



Transistorien lukumäärä PC-koneiden keskusprosessoreissa ajan funktiona. Kehitys on ollut suunnilleen Mooren lain mukaista.

Kitaravahvistimissa käytetään sekä perinteisiä elektroniputkia (tyhjiöputkia) että transistoreja. Vahvistintekniikka vaikuttaa mm. äänen säröytymiseen.

Transistori

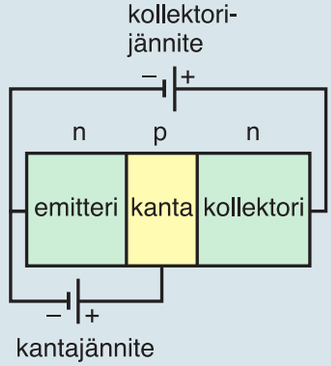
Transistorit ovat puolijohteista valmistettuja elektroniikan peruskomponentteja. Niitä käytetään mm. vahvistimina, elektronisten muistien elementteinä ja erilaisina kytkiminä.

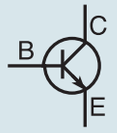
Yksinkertaisimmassa transistorissa (bipolaarinen transistori) on yhdistetty kolme puolijohdetta toisiinsa joko järjestyksessä pnp tai npn. Transistorissa on siis aina sekä päästö- että estosuuntainen liitos. Transistorin toiminta virranvahvistimena perustuu siihen, että transistorin keskimmäiseen osaan, ns. **kantaan** (B), viedään pieni ohjausvirta, jonka avulla kantaan saadaan siirtymään runsaasti varauksenkuljettajia. Kanta on heikommin saostettu kuin transistorin muut osat, **emitteri** (E) ja **kollektori** (C). Näin ollen vain pieni osa emitteriltä kannalle tulevista varauksenkuljettajista rekombinoituu ja suurin osa jatkaa ohuen kannan läpi kollektorille liitoksessa vallitsevan voimakkaan sähkökentän takia. Pienellä ohjausvirralla voidaan näin saada aikaan suuri sähkövirta emitterin ja kollektorin välille.

Bipolaaristen transistorien lisäksi on olemassa ns. **kanavatransistoreja** (*Field Effect Transistor*, FET). Niissä sähkövirran määrää voidaan säädellä ulkoisen jännitteen aiheuttamalla sähkökentällä. Ohuita kanavatransistoreja voidaan valmistaa helposti esimerkiksi piilevyjen pintaan.

Transistorit keksittiin vuonna 1947, ja ne mullistivat pian koko elektroniikkateollisuuden. Kaikki nykyelektroniikka – mm. kotitietokoneet, digitelevisiot ja laajakaistayhteydet – perustuu transistoritekniikkaan. Yksittäisten transistorien sijasta nykyelektroniikassa käytetään useiden komponenttien muodostamia **mikropiirejä** eli integroituja piirejä. Mikropiirejä ovat mm. vahvistimet, mikroprosessorit ja elektroniset muistit.

Yhdessä mikropiirissä saattaa olla satoja miljoonia transistoreja. Niiden määrää on käytetty mittaamaan ja ennustamaan elektroniikan kehitystä. Amerikkalainen *Gordon Moore* esitti vuonna 1964 ns. Mooren lain, jonka mukaan transistorien määrä tavanomaisissa mikropiireissä kaksinkertaistuu aina kahdessa vuodessa. Kehityksen on mahdollistanut komponenttien koon pieneneminen: nanoelektroniikassa komponentit ovat nanometrin kokoluokkaa.





npn-transistorin kaavakuva ja piirrosmerkki.

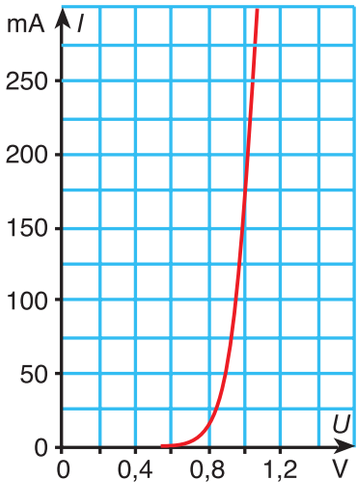
Tehtäviä

4-1. a) Selvitä, milloin ledejä on alettu käyttää ja minkä värisiä ledejä on saatavana.
b) Selvitä, kuinka voidaan valmistaa valkoista valoa lähettävä ledi.
c) Mitä erivärisiä ledejä on kotisi sähkölaitteissa?
d) Selvitä, mitä tarkoittaa oled-näyttö.

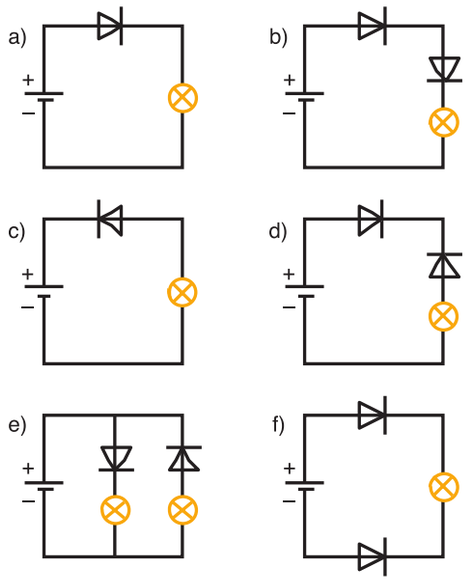
4-2. Käytössäsi on 4,5 V:n paristo, erilaisia vastuksia, sähköjohtoja ja vihreä ledi. Suunnittele ja piirrä kytkentä, jossa ledi valaisee. Kuinka suuri etuvastus kytkennässä tarvitaan?

4-3. Selvitä, mihin tietokoneiden optisen hiiren toiminta perustuu.

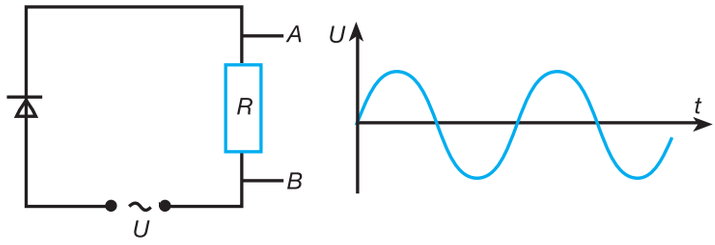
4-4. Selvitä kuvassa olevasta puolijohdediodin ominaiskäyrästä
a) diodin kynnysjännite
b) diodin jännitehäviö, kun diodissa kulkeva sähkövirta on 250 mA
c) diodissa kulkeva sähkövirta, kun diodin päiden välinen jännite on 0,90 V.



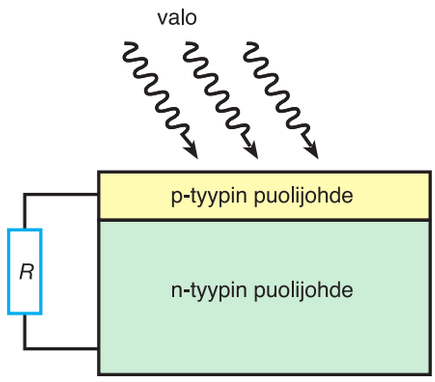
4-5. Vastaa perustellen, missä sivun ylälaidan kytkennöistä lamppu palaa. Oleta, että diodin napojen välinen jännite on suurempi kuin diodin kynnysjännite.



4-6. a) Mitä tarkoitetaan jännitteen tasasuuntauksella?
b) Mihin perustuu diodien käyttö tasasuuntauksessa?
c) Kuvassa on esitetty diodin, vastuksen ja jännitelähteen muodostama virtapiiri sekä virtapiirin jännitelähteen antama vaihtojännite ajan funktiona. Hahmottele kohtien A ja B välinen jännite ajan funktiona.



4-7. Piirroksessa on kuvattu kaavamaisesti aurinkokennon toiminta. Päättele, mihin suuntaan sähkövirta kulkee virtapiirissä.



Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Puolijohteita ovat
a) kupari
b) pii
c) germanium.

2. Puolijohdekomponentit
a) ovat pieniä
b) toimivat heti sähkövirran kytkemisen jälkeen
c) mahdollistivat laitteiden koon pienenemisen.

3. Diodeja voidaan käyttää
a) vaihtovirran tasasuuntaamiseen
b) jännitteen säätöön
c) valaistukseen.

4. Kun diodi kytketään päästösuuntaan, diodin
a) anodi kytketään jännitelähteen plusnapaan
b) anodi kytketään jännitelähteen miinusnapaan
c) läpi kulkee sähkövirta.

5. Donorilla tarkoitetaan
a) epäpuhtausatomia
b) atomia, jonka ulkokuorella on yksi elektroni enemmän kuin puolijohteen atomissa
c) atomia, jonka ulkokuorella on yksi elektroni vähemmän kuin puolijohteen atomissa.

6. Donoreilla seostettua puolijohdetta kutsutaan
a) n-tyypin puolijohteeksi
b) p-tyypin puolijohteeksi
c) pn-tyypin puolijohteeksi.

7. Varauksenkuljettajana p-tyypin puolijohteessa on
a) positiivinen aukko
b) negatiivinen elektroni
c) neutraali neutroni.

8. Kun piihin seostetaan kolmannen pääryhmän alkuainetta, esimerkiksi galliumia
a) syntyy n-tyypin puolijohde
b) syntyy p-tyypin puolijohde
c) galliumatomin ja piiatomien välisiin sidoksiin jää yhteen kohtaan aukko.

9. Pitävätkö seuraavat väitteet paikkansa?
a) Rekombinaatiossa elektroni asettuu atomisidoksissa olevaan aukkoon.
b) Kynnysjännitteellä tarkoitetaan diodin n-puolen ja p-puolen välistä potentiaalieroa.
c) Estosuuntaisessa kytkennässä diodin p-puoli on yhdistetty jännitelähteen positiiviseen napaan.

10. Pitävätkö seuraavat väitteet paikkansa?
a) Energialtaan korkein elektroneja sisältävä energiavyö on valenssivyö.
b) Johtavuusvyö on valenssivyön yläpuolella olevien energiatasojen yhteisnimitys.
c) Aine voi johtaa sähköä, jos sen johtavuusvyöllä on elektroneja.

Tiivistelmä

- Puolijohteita ovat mm. pii ja germanium.
- Puolijohteet ovat sähkönjohtokyvyltään johteiden ja eristeiden välissä.
- Diodit ja transistorit ovat tärkeimpiä puolijohdekomponentteja.
- Diodin napoja kutsutaan anodiksi (+) ja katodiksi (–).
- Donorilla tarkoitetaan epäpuhtausatomia, jonka ulkokuorella on yksi elektroni enemmän kuin puolijohteen atomissa.
  Akseptorilla tarkoitetaan epäpuhtausatomia, jonka ulkokuorella on yksi elektroni vähemmän kuin puolijohteen atomissa.
- Seostamalla puolijohteita tietyillä seosaineilla voidaan valmistaa n-tyypin ja p-tyypin puolijohteita.
  n-tyypin puolijohteessa varauksenkuljettajina toimivat negatiivisesti varatut elektronit.
  p-tyypin puolijohteessa varauksenkuljettajina toimivat positiivisten hiukkasten tavoin käyttäytyvät aukot.
- Rekombinaatiolla tarkoitetaan elektronien ja aukkojen yhtymistä puolijohteessa.
- Diodi kytketään päästösuuntaan, kun p-tyypin pää kytketään jännitelähteen positiiviseen ja n-tyypin pää negatiiviseen napaan. Kun päästösuuntainen jännite on ylittänyt ainekohtaisen kynnysjännitteen, sähkövirta kasvaa nopeasti jännitteen kasvaessa.
- Kun diodi on kytketty estosuuntaan, sähkövirta ei pääse kulkemaan puolijohdediodin läpi.
- Elektronin energialla voi olla vain tietyt erilliset arvot, joita kuvataan energiatasoilla. Energiavyöt koostuvat suuresta määrästä energiatasoja, joiden energiat ovat hyvin lähellä toisiaan.
- Energialtaan korkein energiavyö, jonka kaikilla energiatasoilla on elektroni, on valenssivyö.
  Johtavuusvyö on valenssivyön yläpuolella olevien energiatasojen yhteisnimitys.
  Johtavuusvyöllä olevat elektronit pääsevät liikkumaan vapaasti. Aine voi johtaa sähköä, jos sen johtavuusvyöllä on elektroneja.

Kertaustehtäviä

Etsi laskemalla yksi oikea vaihtoehto tehtävissä 1–10.

1. Vastuksen läpi kulkevan sähkövirran suuruus on 84 mA, kun vastuksen päiden välinen jännitehäviö on 4,5 V. Kun tämä vastus kytketään 12 V:n jännitteeseen, sen läpi kulkevan sähkövirran suuruus on

a) 73 mA b) 220 mA c) 320 mA.

2. Vastukset, joiden resistanssit ovat $R_1 = 220\ \Omega$ ja $R_2 = 330\ \Omega$, kytketään rinnan ja yhdistetään jännitelähteen napoihin. Kun napajännite on 6,2 V, vastuksen 1 läpi kulkevan sähkövirran suuruus on

a) 19 mA b) 28 mA c) 47 mA.

3. Kuormitetun pariston napajännitteeksi mitattiin 3,8 V, kun sähkövirta oli 31 mA. Pariston jännite oli 4,5 V, kun paristoa ei kuormitettu. Pariston sisäinen resistanssi oli

a) 23 Ω b) 2,3 Ω c) 230 Ω.

4. Energiansäästölampussa on merkintä 11 W/230 V. Oletetaan lampun resistanssi vakioksi. Lampun resistanssi on

a) 12 Ω b) 4,8 kΩ c) 7,0 kΩ.

5. Kahden ilmassa olevan positiivisesti varatun pienen pallon välimatka on 9,0 cm. Pallojen välillä vallitsee 4,1 mN:n hylkimisvoima. Pallojen varauksien suuruus on

a) 18 mC b) 20 μC c) 61 nC.

6. Sähköisen voiman yhtälöstä $F = Eq$ saadaan sähkökentän voimakkuuden yksiköksi N/C (newton/coulombi). Sähkökentän voimakkuudelle voidaan käyttää myös yksikköä

1) 1 J/A 2) 1 W/A 3) 1 NΩ/V
4) 1 V/m.

7. Röntgenputkessa kiihdytetään elektroneja 120 kV:n jännitteellä. Kuinka paljon energiaa kuluu lämpenemiseen anodissa yhden elektronin jarruuntuessa? Oletetaan, että elektronin liike-energia kuluu kokonaisuudessaan lämpenemiseen.

a) $1{,}6 \cdot 10^{-17}$ J b) $1{,}9 \cdot 10^{-14}$ J
c) $0{,}8 \cdot 10^{-14}$ Nm

8. Kondensaattorit A (1,0 μF), B (0,50 μF) ja C (1,5 μF) on kytketty toisiinsa siten, että B ja C ovat rinnan ja A on sarjassa niiden kanssa. Kondensaattoriyhdistelmän kokonaiskapasitanssi on

a) 670 nF b) 3 nF c) 1,375 μF.

9. Varaamattomaan kappaleeseen tuodaan 15 mC:n varaus, jolloin kappaleen potentiaali kasvaa 4,5 kV. Kappaleen kapasitanssi on

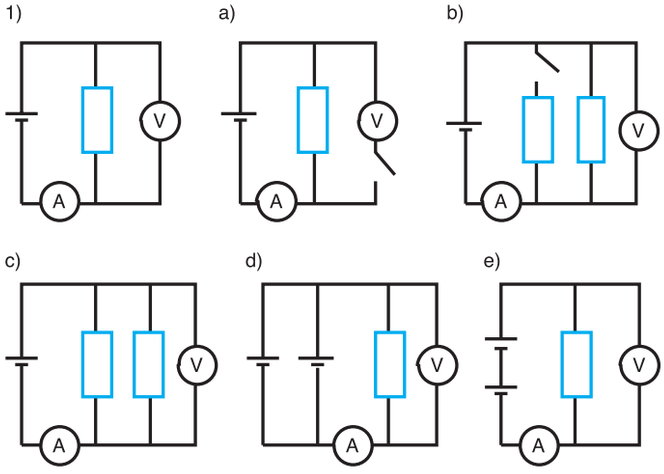
a) 3,3 μF b) 0,3 F c) 0,68 μF.

10. Kondensaattori, jonka kapasitanssi on 200 μF, on varattu 1,0 kV:n jännitteeseen. Sen rinnalle kytketään varaamaton 50 μF:n kondensaattori. Jännite kondensaattoriyhdistelmän navoissa on kytkemisen jälkeen

a) 0 kV b) 5,0 kV c) 0,8 kV.

Seuraavissa tehtävissä mittarien ja jännitelähteiden sisäisiä resistansseja ei oteta huomioon, ellei niitä mainita tehtävässä.

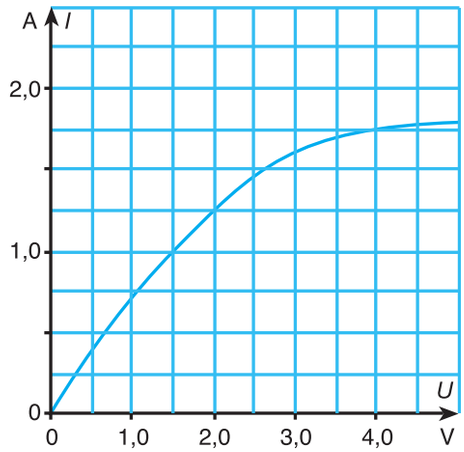
11. Seuraavan sivun kuvan kytkennässä 1 mitattiin jännitteeksi 1,5 V ja sähkövirraksi 100 mA. Päättele voltti- ja ampeerimittarien lukemat muissa kytkennöissä. Kaikki vastukset ja paristot ovat keskenään samanlaisia.



12. a) Johtimen päiden välinen jännite on 3,0 V. Johtimessa kulkeva sähkövirta on 0,13 mA. Laske sähkövirta, kun johtimen päiden välinen jännite on 12 V. Johtimen lämpötila pysyy vakiona.
b) Oppilaat tutkivat johtimessa tapahtuvan jännitehäviön riippuvuutta johtimessa kulkevasta sähkövirrasta. Piirrä mittaukseen soveltuva kytkentäkaavio ja määritä graafisesti johtimen resistanssi oheisten mittaustulosten perusteella.

I/A	0,5	1,1	2,1	3,0
U/V	5,1	12	22	33

13. Kuvaaja esittää polttimon läpi kulkevan sähkövirran ja jännitehäviön välistä riippuvuutta.
a) Määritä polttimon resistanssi, kun jännitehäviö on 1,5 V.
b) Määritä polttimon resistanssi, kun polttimon läpi kulkeva sähkövirta on 1,7 A.
c) Miksi resistanssi muuttuu?
d) Onko Ohmin laki voimassa polttimolle?



14. Oppilastöissä piti tutkia pienen hehkulampun (nimellisjännite 6,3 V) läpi kulkevan sähkövirran ja lampussa tapahtuvan jännitehäviön välistä riippuvuutta. Käytettävissä oli 6 V:n akku, säätövastuksia, tarpeelliset mittarit ja johtimia.
a) Piirrä kaavio mittaukseen soveltuvasta kytkennästä.
b) Eräässä kokeessa saatiin seuraavat tulokset:

U/V	0,26	0,53	1,00	1,52	2,00	3,00	4,01	5,00	6,00
I/A	0,82	1,41	1,84	2,22	2,55	3,05	3,56	4,01	4,35

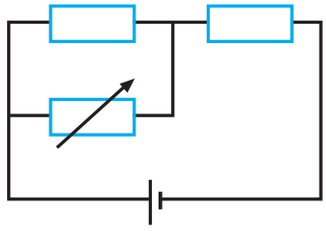
Lamppu alkoi hehkua noin 2 A:n virralla ja loisti kirkkaana kokeen lopussa. Piirrä $I = I(U)$ -kuvaaja. Miten kuvaajan muoto voidaan selittää?

15. a) Alumiinilangan pituus on 230 m ja poikkipinta-ala 0,45 cm^2. Laske langan resistanssi.
b) Rautalanka ja alumiinilanka ovat yhtä pitkät, ja niiden resistanssit ovat yhtä suuret. Alumiinilangan poikkipinta-ala on 5,0 mm^2. Laske rautalangan poikkipinta-ala.

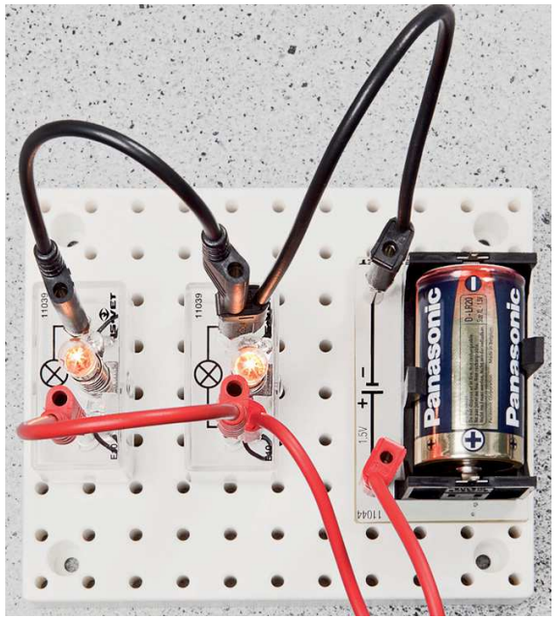
16. Kolme vastusta, joiden resistanssit ovat 15,0 Ω, 30,0 Ω ja 45 Ω, kytketään sarjaan 12 V:n akun kanssa.
a) Laske piirissä kulkeva sähkövirta.
b) Laske kussakin vastuksessa tapahtunut jännitehäviö.
c) Kuinka suuri on jännitehäviöiden summa?

17. Tee selkoa
a) lyijyakun b) Voltan parin toimintaperiaatteesta.

18. Kaksi 200 Ω:n vastusta ja säätövastus kytketään jännitelähteeseen kuvan mukaisesti.
a) Laske vastusyhdistelmän kokonaisresistanssi, kun säätövastuksen resistanssin arvoksi on valittu 200 Ω.
b) Vastusyhdistelmän resistanssiksi halutaan 380 Ω. Mikä tulee tällöin olla säätövastuksen resistanssi?



19. Kaksi lamppua kytketään valokuvan mukaisesti 1,5 V:n paristoon.
a) Piirrä kytkentäkaavio valokuvan kytkennästä.
b) Laske lamppujen läpi kulkevien sähkövirtojen suuruudet, kun kummankin lampun resistanssi on 15 Ω.



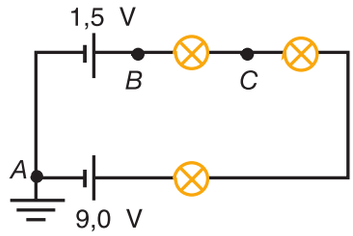
20. a) Missä laitteissa hyödynnetään sähkövirran lämpövaikutusta?
b) Vastuksen resistanssi on 250 Ω. Millä teholla energiaa muuntuu vastusaineen sisäenergiaksi, kun vastuksen läpi kulkeva sähkövirta on 3,0 A?
c) Tasavirtalähteeseen kytketty 150 Ω:n vastus asetetaan kalorimetrissa olevaan veteen. Veden lämpötila kohoaa 50,0 celsiusastetta, kun 3,5 A:n sähkövirta on kytkettynä 7,5 minuuttia. Laske veden massa. Oletetaan, että energiahäviöt ovat pienet.

21. a) Yhden neliömetrin kokoinen aurinkokenno tuottaa 150 W:n sähkötehon. Kuinka suuri aurinkokennon pinta-alan tulisi olla, jotta se korvaisi 1000 MW:n ydinvoimalan?
b) Aurinkokennolla, jonka teho on 150 W, lämmitetään 2,0 kg vettä. Lämmittämisen hyötysuhde on 0,90. Veden lämpötila kohoaa 35 celsiusastetta. Laske lämmitysaika.

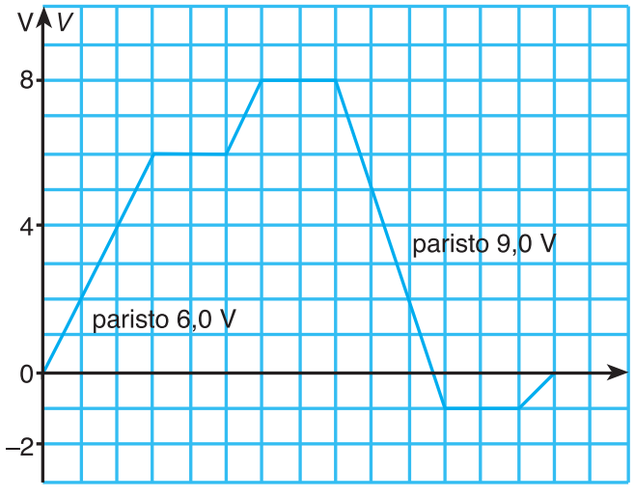
22. a) Millaista kuvaajaa kutsutaan pariston kuormituskäyräksi?
b) Millaisella koejärjestelyllä kuormituskäyrä saadaan määritettyä? Piirrä kytkentäkaavio.
c) Mitä tietoja kuormituskäyrästä saadaan?
d) Suljetussa virtapiirissä on paristo, jonka lähdejännite on 4,5 V. Pariston sisäinen resistanssi on 0,23 Ω. Piiriin kytketyn lampun resistanssi on 150 Ω. Laske piirissä kulkeva sähkövirta.

23. a) Yleismittaria käytetään sähkövirran mittaamiseen. Ampeerimittarin sisäinen resistanssi on 5,0 Ω ja mittarin mittausalueen maksimivirta 2,0 mA. Kuinka suurta sivuvastusta on käytettävä, jotta mittarilla voisi mitata 0…10 mA:n sähkövirtoja?
b) Kuinka suurta etuvastusta on käytettävä, jotta a-kohdan mittarilla voitaisiin mitata 0…120 V:n jännitteitä?

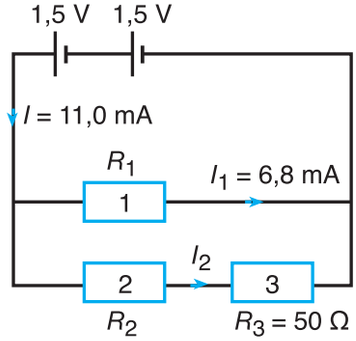
24. a) Piirrä oheisen virtapiirin potentiaalikäyrä. Kaikki lamput ovat samanlaisia.
b) Määritä pisteiden *B* ja *C* välinen jännite.
c) Määritä pisteiden *C* ja *A* välinen jännite.
d) Mikä merkitys on pisteen *A* maadoituksella?



25. Piirros esittää suljetun virtapiirin potentiaalikäyrää. Piirrä virtapiirin kytkentäkaavio. Kytkennässä toisen pariston negatiivinen napa on maadoitettu.

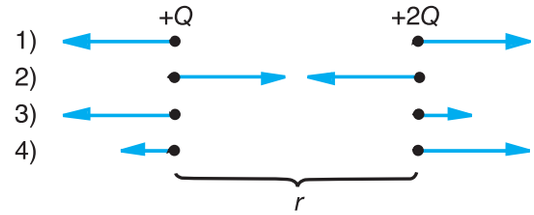


26. Laske
a) vastusten 1 ja 2 resistanssit ja sähkövirran I_2 suuruus
b) vastuksen 2 tehonkulutus.



27. Elektroskoopilla (elektrometrilla) voidaan havaita sähkövarauksia.
a) Selitä laitteen toiminta.
b) Mitä tapahtuu, kun varauksettoman elektroskoopin nupin lähelle tuodaan varattu kappale?

28. a) Kaksi hiukkasta, joiden sähkövaraukset ovat $+Q$ ja $+2Q$, ovat tyhjiössä etäisyydellä r toisistaan. Mikä kuvista esittää niiden välisiä sähköisiä voimia, kun vektorin pituus on verrannollinen voiman suuruuteen?

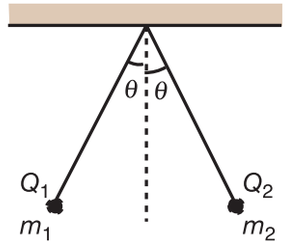


b) Miten a-kohdan oikean vastauksen mukaiset voimat muuttuvat, jos
1) varauksen $+Q$ tilalla on $+3Q$
2) varausten välimatka pienenee puoleen ja varauksen $+Q$ tilalla on $-Q$?

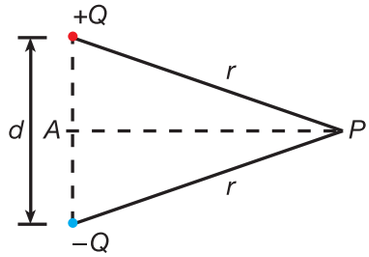
29. Kahden positiivisesti varatun pallon keskipisteiden välinen etäisyys on 0,12 m. Pallot ovat tyhjiössä ja kohdistavat toisiinsa 56 mN:n suuruisen hylkivän, sähköisen voiman.
a) Laske pallojen varaukset, kun ne oletetaan yhtä suuriksi.
b) Kuinka monta elektronia palloista puuttuu?

30. Kaksi kevyttä palloa, joiden massat ovat m_1 ja m_2 ja varaukset Q_1 ja Q_2, on ripustettu samanpituisilla langoilla samasta pisteestä. Perustele, missä seuraavista kolmesta tapauksesta pallot asettuvat oheisen kuvion mukaisesti ja missä eivät.

1) $m_1 = m_2$ ja $Q_1 = Q_2$
2) $m_1 = m_2$ ja $Q_1 = 2Q_2$
3) $m_1 = 2m_2$ ja $Q_1 = Q_2$



31. Sähködipoli muodostuu tyhjiössä olevista varauksista $+Q$ ja $-Q$, joiden välimatka on d. Laske sähkökentän voimakkuus dipolin keskinormaalin pisteessä P. Pisteeseen P sijoitetaan varaus q. Kuinka suuri työ tehdään, kun q siirretään keskinormaalia pitkin pisteestä P pisteeseen A?

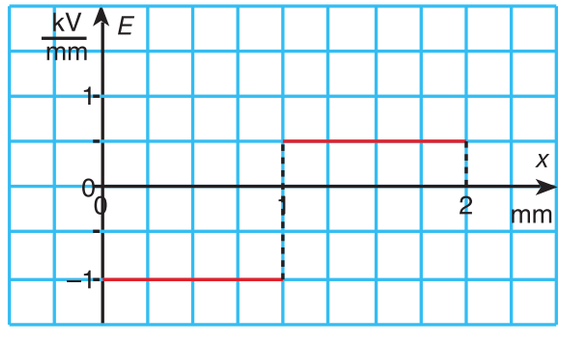


32. Kaksi varausta ($Q_1 = +2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C ja $Q_2 = -8{,}0 \cdot 10^{-8}$ C) sijoitetaan ilmaan etäisyydelle $a = 50$ cm toisistaan. Laske, missä pisteessä sähkökentän voimakkuus on nolla varauksia yhdistävällä suoralla. [Joensuun yliopisto 1994]

33. a) 165 V:n ja 95 V:n potentiaaleja vastaavien tasapotentiaalitasojen välimatka on 3,0 cm homogeenisessa sähkökentässä. Määritä tasojen välinen jännite sekä sähkökentän voimakkuus.
b) Homogeenisen sähkökentän pisteiden A ja B potentiaalit ovat $+110$ V ja $+230$ V. Hiukkanen, jonka varaus on 45 nC, siirtyy pisteestä A pisteeseen B. Laske sähköisen voiman tekemä työ.

34. Homogeenisen sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan 0,40 kV/m. Sähkökentän kenttäviivojen suunta on koordinaatiston x-akselin suunta. Koordinaatistossa pituusyksikkö on 1,0 cm.
a) Määritä sähköisen voiman tekemä työ, kun hiukkanen, jonka sähkövaraus on $-1{,}2$ μC, siirtyy pisteestä $A(-1, 2)$ pisteeseen
1) $B(-1, 4)$ 2) $C(2, 2)$ 3) $D(0, 0)$.
b) Laske jännitteet U_{AB}, U_{AC} ja U_{AD}.

35. Kolme yhdensuuntaista ohutta metallilevyä A, B ja C ovat millimetrin välein tässä järjestyksessä vasemmalta oikealle. Levyn B potentiaali on positiivinen, ja levy A on maadoitettu ja sen kohdalle on asetettu origo. Oheisessa kuvassa on esitetty sähkökentän voimakkuus $\vec{E}$ levyjen A, B ja C välillä. Piirrä $V(x)$:n kuvaaja. Määritä potentiaali $V(x)$ välillä 0,0 mm ... 2,0 mm. Piirrä levyt A, B ja C sekä niiden väliin sähkökenttää kuvaavat kenttäviivat.
[MFKA preliminäärikoe 2004, 7]



36. Pieni ilmassa oleva metallipallo roikkuu langasta homogeenisessa sähkökentässä kahden metallilevyn välissä. Levyjen välinen jännite on 130 V ja välimatka 5,0 cm. Pallon massa on 2,7 g. Tällöin pallon ripustuslanka muodostaa 2,4°:n kulman pystysuunnan kanssa. Laske pallon sähkövaraus.

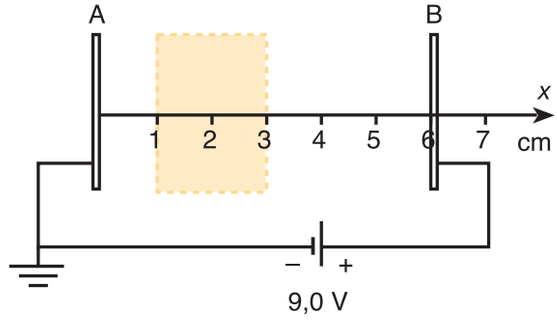
37. Öljypisara, jonka massa on 30,0 pg ja varaus $2e$, pysyy paikallaan kahden vaakasuoran johdelevyn välisessä sähkökentässä. Laske levyjen välinen jännite, kun ne ovat 1,0 cm:n etäisyydellä toisistaan.

38. Elektroni tulee kohtisuorasti homogeenisen sähkökentän keskikohtaan nopeudella $1{,}1 \cdot 10^7$ m/s. Homogeenisen sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan 15 kN/C, ja kenttä suuntautuu alaspäin. Levyjen välimatka on 6,0 cm ja sähkökentän vaakasuora leveys 5,1 cm.
a) Piirrä pääpiirteittäin elektronin rata sähkökentässä.
b) Laske elektronin pystysuora siirtymä sen poistuessa sähkökentästä.
c) Laske nopeus, jolla elektroni poistuu sähkökentästä.

39. Levossa oleva α-hiukkanen, ${}_2^4\mathrm{He}^{2+}$-ioni, kiihdytetään 130 V:n jännitteellä. α-hiukkasen massa on $6{,}64 \cdot 10^{-27}$ kg. Laske ionin loppunopeus.

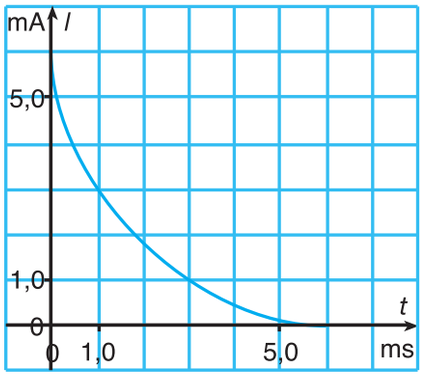
40. a) Sähkökenttää kuvataan kenttäviivoilla. Miten kenttäviivat kuvaavat staattisen sähkökentän ominaisuuksia?
b) Eristetty metallipallo, jonka halkaisija on 1 cm ja varaus +2 nC, on aluksi 2,5 m:n päässä toisesta eristetystä metallipallosta, jonka halkaisija on 10 cm ja varaus +0,05 nC. Määritä pienempään palloon kohdistuva voima.
c) Pieni pallo viedään lähelle ison pallon pintaa. Miksi pallot vetävät nyt toisiaan puoleensa?

41. Laajat yhdensuuntaiset johdelevyt A ja B on kytketty 9,0 V:n paristoon. Valitaan x-akseli kohtisuoraan levyjä vastaan kuvan mukaisesti.
a) Esitä graafisesti levyjen välisen sähkökentän voimakkuus ja potentiaali paikan x funktiona (kuvaajat $E = E(x)$ ja $V = V(x)$).
b) Piirrä a-kohdassa kysytyt kuvaajat myös siinä tapauksessa, että kuvassa katkoviivalla esitettyyn paikkaan on asetettu levyjen suuntainen varaamaton johdelevy, jonka paksuus on 2,0 cm.



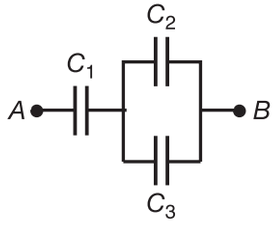
42. a) Miksi suurjännitelaitteissa yleensä pyritään välttämään teräviä särmiä ja kärkiä?
b) Miten ja minkä ilmiön vuoksi ilmaeristeisen kondensaattorin levyjen väliin asetettu eristekappale muuttaa kondensaattorin kapasitanssia?

43. Kondensaattori varattiin 9,0 V:n jännitteellä, minkä jälkeen se purettiin vastuksen läpi. Tietokoneen näyttöruudulle saatiin purkausvirta ajan funktiona.
a) Piirrä kondensaattorin varaamiseen soveltuva kytkentäkaavio.
b) Määritä kondensaattorin kapasitanssi.
c) Määritä vastuksen resistanssi.

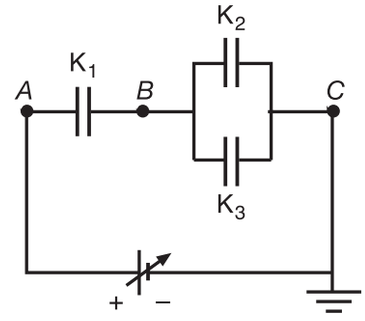


44. Kahden kondensaattorin, joiden kapasitanssit ovat 5,0 nF ja 9,0 nF, toiset levyt maadoitetaan ja toiset kytketään potentiaaleihin +110 V ja +65 V. Kun kondensaattorit on irrotettu jännitelähteistä, niiden maadoittamattomat levyt yhdistetään. Kuinka suuri varaus siirtyy levystä toiseen, ja mihin suuntaan elektronit siirtyvät?

45. Kuvan kondensaattorisysteemissä kapasitanssit ovat $C_1 = 8{,}30\ \mu\text{F}$, $C_2 = 4{,}10\ \mu\text{F}$ ja $C_3 = 2{,}10\ \mu\text{F}$.
a) Laske kondensaattorisysteemin kokonaiskapasitanssi.
b) Välille AB kytketään 110 V:n jännite. Laske kondensaattorin 2 varaus ja levyjen välinen jännite. [TKK 2003]



46. Oheisen kytkennän kondensaattorien kapasitanssit ja läpilyöntikestävyydet ovat K_1 (120 μF, 8,0 V), K_2 (47 μF, 10 V) ja K_3 (22 μF, 16 V).
a) Laske systeemin kapasitanssi.
b) Kuinka suuri pisteen B potentiaali voi korkeintaan olla?
c) Kuinka suuri voi jännite U_{AC} korkeintaan olla? [S2001, 7]



47. Selvitä seuraavat käsitteet.
a) p-tyypin puolijohde
b) n-tyypin puolijohde

48. Selvitä pn-puolijohdeliitokseen liittyen seuraavat käsitteet.
a) rekombinaatio
b) tyhjennysalue
c) kynnysjännite
d) päästösuuntaan kytketty diodi

49. Selitä täsmällisesti seuraavat käsitteet.
a) energiavyö
b) valenssivyö
c) johtavuusvyö

50. Selvitä, miten eristeen ja puolijohteen energiavyörakenteet poikkeavat toisistaan.

Vastauksia

1-1. b) 4), 2), 3), 1) ja 5)
1-7. a) tosi b) epätosi c) epätosi
d) epätosi e) tosi f) tosi g) tosi h) epätosi
1-13. a) 1,5 V b) 1,5 V c) 1,5 V
d) 3,0 V e) 4,5 V f) 1,5 V g) 1,5 V
h) 1,5 V i) 1,5 V j) 1,5 V k) 1,5 V
1-14. a) 32 Ah b) ei c) 1,0 A
1-15. a) 4,6 V ja 3,0 V b) 32 mA ja 50 mA
c) 190 Ω ja 120 Ω
1-16. 21 Ω
1-17. c) ei
1-18. a) ei b) 4,5 V c) 75 Ω
1-19. a) 2,20 A b) 1,36 V
1-20. a) 18 V b) 3,0 Ω
1-21. a) kyllä b) ei c) ei
1-22. a) 1,5 V; 2,0 V; 1,0 V
b) vain vas. puol. lamppu valaisee
1-23. a) 4,5 V b) −4,5 V c) 3,0 V
1-24. a) 10 V; 2,0 V; 20 V b) 32 V
1-25. a) 6,0 V
1-28. 270 Ω, 22 kΩ, 56 Ω
1-31. b) 500 Ω ja 125 Ω c) lanka 2 d) 2:1
1-32. a) 13 Ω b) 0,50 cm^2 c) 21 V
1-33. 9-kertaiseksi
1-34. $1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ωm, kupari
1-35. 66 Ω
1-36. $4{,}2 \cdot 10^{-3}$ 1/K
1-37. a) 0,6 Ωm
1-38. a) 60 Ω b) 15 Ω
1-39. 3,0 Ω
1-40. 1700 Ω, 190 Ω, 870 Ω, 390 Ω
1-42. 96 mA
1-44. 3,7 A
1-45. 0,16 A; 0,24 A; 1,2 A
1-46. 1,2 A; 4,8 A
1-48. 6,6 V
1-49. 12 V
1-50. 2,0 kΩ ja 4,0 kΩ
1-51. a) 2,4 Ω b) 480 Ω
1-52. a) 30 €
1-54. a) 0,26 A, 880 Ω b) 50 V
1-55. c)
1-56. a) 0,91 A ja 5,7 A
b) 100 Ω ja 150 Ω sarjaan; kaikki rinnan
1-57. 4,8 A
1-58. a) korkeintaan 3,7 kW
1-59. 640 g
1-60. 380 s
1-61. a) 2,0 A; 6,0 V; 12 W ja 2,0 A; 12 V ja 24 W
b) 6,0 A; 110 W ja 3,0 A; 54 W
1-62. b) 1,7 W
1-63. c) 150 Ω
1-64. a) 2,3 kJ/g b) 25 kJ
1-65. a) 1,6 V ja 1,3 Ω
1-66. a) 2,5 Ω ja 1,2 V; 0,60 A b) oikeanpuoleinen
1-67. a) 11 V b) 97 mΩ
1-68. 2,2 Ω ja 4,7 V
1-70. a) 1. 10,1 Ω 2. 19,8 Ω 3. 41,1 Ω
b) 4,68 V; 1,4 Ω c) 3,39 A
1-72. kaikki yhtä kirkkaita
1-73. a) 4,5 V ja 3,0 Ω b) 1,5 V ja 0,30 Ω
1-74. a) 2,0 A b) 0,57 A
1-75. a) 120 A
1-76. a) 0,20 A b) 0,99 V ja 1,1 V
1-79. a) 2,4 A b) 0,55 A c) 0,46 A d) 1,7 A
1-80. a) 0,30 A b) 0,23 A
1-81. 2,5 A ja 0 V
1-82. 240 mA
1-83. maks. 230 V
1-84. 90 mA, 170 mA, 260 mA, 7,5 V
1-85. 34 %
1-86. b) 0,33 A c) 1,8 W
1-87. 0 V, 2,7 V ja 14,3 V
1-89. a) 4,58 V b) 4,24 V c) 4,07 V
1-90. 0,69 Ω; 3,7 V

Testaa, osaatko s. 73
1. a b **2.** b c **3.** b **4.** c **5.** b **6.** a c **7.** c
8. c **9.** a b c **10.** b c

2-5. b) $4{,}8065319 \cdot 10^{-19}$ C, $-3{,}2043546 \cdot 10^{-19}$ C
2-6. a) $6{,}2 \cdot 10^{18}$ b) $2{,}6 \cdot 10^{10}$ c) $5{,}9 \cdot 10^{7}$
d) $0{,}16 \cdot 10^{-9}$ C
2-7. a) 0 nC pallosta A palloon B
b) 2,5 nC pallosta A palloon B
c) −4 nC pallosta A palloon B
d) −5 nC pallosta B palloon A
2-8. a) Pienenee neljäsosaan.
b) Kasvaa 9-kertaiseksi.
c) Kasvaa 4-kertaiseksi.
2-9. c)
2-10. ylimmässä F (vetovoima), keskimmäisissä $2F$ (hylkimisvoimia), alimmissa F (hylkimisvoimia)
2-11. esim. C: $+Q$ ja D: $+Q$; E: $+Q$ ja F: $-2Q$; G: $+Q$ ja H: $-\frac{1}{4}Q$
2-12. b) $|\overline{F}_{C,1}| = |\overline{F}_{A,1}|$, $|\overline{F}_{B,1}| = |\overline{F}_{C,2}|$, $|\overline{F}_{B,2}| = |\overline{F}_{A,2}|$,
$|\overline{F}_{B,2}| = |\overline{F}_{A,2}| = |\overline{F}_{B,1}| = |\overline{F}_{C,2}| = 2|\overline{F}_{C,1}| = 2|\overline{F}_{A,1}|$
c) suoraan alas
2-13. a) ja b) yhtä suuret
c) A:n langan kulma suurempi kuin B:n
2-15. a) 29 kN (hylkimisvoima)
b) 360 kN (hylkimisvoima)
2-16. −24 nC
2-17. a) $9 \cdot 10^{-8}$ N b) $4 \cdot 10^{-47}$ N
2-18. 6,9 μN, hylkimisvoima
2-19. 19 μN (oikealle)
2-20. 0,053 N, 21°
2-21. samanmerkkisiä 1,9 nC tai −1,9 nC
2-22. a) myötäpäivään
b) 6,8 cm keskipisteestä vasemmalle
2-23. a) 240 mN vasemmalle b) eivät
2-30. a) 2,5 MN/C, positiivisen x-akselin suuntaan
b) 2,0 MN/C, negatiivisen x-akselin suuntaan
2-31. a) 1 μN b) −6,7 nC
2-32. 515 GN/C, poispäin ytimen protonista
2-33. a) $4{,}4 \cdot 10^{11}$ m/s^2, suunta sähkökentän suunnalle vastakkainen
b) $\overline{E} \uparrow\uparrow \overline{AB}$
2-34. 12 kV/m, ylös
2-35. a) 6,0 kN/C, varaukseen päin
b) 90 nN, (vetovoima)
2-36. a) $\overline{E} = \overline{0}$
b) 420 kN/C, positiivisesta negatiiviseen
2-37. 3,8 kN/C, 43°
2-38. A: 59 kN/C, alas; B: 7,3 kN/C, alas
2-39. 4,1 cm pienemmästä varauksesta suurempaan päin
2-40. −4,5 μC
2-41. $\overline{E} = \overline{0}$
2-42. 12 μC/m^2
2-43. 1) vain vääntömomentti
2) kokonaisvoima ja vääntömomentti
3) vain kokonaisvoima
2-44. kentän suunta oikealle alaviistoon, voiman suunta vasemmalle yläviistoon
2-45. a) ylhäällä oikealla
b) ylemmissä vasemmalle, alemmassa oikealle
c) kiihtyvää, oikealle
2-48. a) 200 V b) 400 V
c) 2,0 kV/m, levystä A levyyn B d) 32 aJ
2-49. 110 V
2-50. a) 17 kV/m b) 0,76 J
2-51. a) 140 V b) $-6{,}9 \cdot 10^{-17}$ J
2-52. a) 160 nJ b) 25 V
2-53. a) 0,73 nC b) 0,12 V
2-54. a) 13 mN (kohti negatiivista levyä)
b) 820 N/C, positiivisesta levystä negatiiviseen levyyn
2-55. ±14 pC
2-56. $E_{AB} = 1{,}0$ kV/m, $E_{BC} = 2{,}0$ kV/m
2-57. $6{,}9 \cdot 10^{13}$ m/s^2, $7{,}0 \cdot 10^{12}$ -kertainen
2-58. a) $110 \cdot 10^{9}$ m/s^2, $210 \cdot 10^{12}$ m/s^2
b) 22 ns c) 27 μm
2-59. 1,2 kV
2-60. 46 mm

2-61. a) 2,5 mm b) 1,7°
2-62. 120 V
2-63. a) $4{,}0 \cdot 10^{-16}$ J b) 170 eV
2-64. a) 0,17 Mm/s b) 24 aJ
2-65. a) $-5{,}6 \cdot 10^{-16}$ N, sähkökentälle vastakkainen
b) $8{,}9 \cdot 10^{-30}$ N, gravitaatiokentän suuntainen
c) $8{,}4 \cdot 10^{-18}$ J, 53 eV
2-66. a) 7,0 kV b) 1,5 kV
2-67. 15 Mm/s
2-68. 5,2 Mm/s
2-69. a) $67 \cdot 10^{3}$ m/s b) $6{,}2 \cdot 10^{6}$ m/s
2-70. a) $V_A = 150$ V, $V_B = 110$ V b) 38 V
c) 7,6 nJ

Testaa, osaatko s. 125
1. a **2.** a **3.** a **4.** b **5.** b c **6.** a **7.** c
8. b **9.** c **10.** a b c

3-3. Varaus ei muutu. Kapasitanssi muuttuu 5-kertaiseksi.
3-4. a) ei muutu b) kaksinkertaistuu
c) ei muutu
3-9. b) 4,5 V c) 16 s d) 1,7 mA
3-10. a) 460 pF b) 11 nC
3-11. a) 0,087 C b) 8,9 pF
3-12. b) 1,1 mC
3-13. a) −42 mC (pienenee)
b) $8{,}3 \cdot 10^{-12}$ F/m
3-14. a) 1,1 m^2 b) 12-kertaiseksi
3-15. b) enintään 5,7 vuoden välein
3-16. a) 3,0 MV b) 31 mC
3-17. 9,0 F
3-18. a) 1,1° b) 1,1° (kulma ei muutu)
3-19. a) 3,2 J b) neljäsosaan
3-20. 0,24 J
3-21. 150 V
3-22. a) $8E$ b) 2,1 nF
3-23. a) 3,5 nJ b) 17 nJ
3-24. 25mJ
3-25. a) 0,12 J b) läpilyönti
3-26. kytkennällä 2; 1,2 μF
3-28. a) 91 fF, 11 pC, 44 V, 240 pJ
b) 0,95 pF, 30 pC, 120 V, 1,8 nJ
3-29. 25 V
3-30. 590 V
3-31. a) 3,1 μF b) 0,53 mC, 88 V, 23 mJ
3-32. a) 53 pF b) 120 pF c) 69 pF
3-33. b) 28 Ω c) 0,59 μC
3-34. a) 0,92 W b) 33 μJ
3-35. a) −16 V b) 0 V c) 5,3 μC

Testaa, osaatko s. 151
1. a c **2.** c **3.** c **4.** a **5.** a b c **6.** a
7. a b **8.** b **9.** a **10.** a b

4-2. 2,4 V, 120 Ω
4-4. a) 0,90 V b) 1,04 V c) 50 mA
4-5. a) palaa b) palaa c) ei pala
d) ei pala e) vas. palaa, oik. ei f) ei pala

Testaa, osaatko s. 169
1. b c **2.** a b c **3.** a b c **4.** a c **5.** a b
6. a **7.** a **8.** b c **9.** a b **10.** b c

Kertaustehtävät
1. b) **2.** b) **3.** a)
4. b) **5.** c) **6.** 4
7. b) **8.** a) **9.** a)
10. c)
12. a) 0,52 mA b) 11 Ω
13. a) 1,5 Ω b) 2,1 Ω d) ei
15. a) 0,14 Ω b) 18 mm^2
16. a) 0,13 A b) 2,0 V; 4,0 V; 6,0 V c) 12 V
18. a) 300 Ω b) 1800 Ω
19. 0,10 A
20. b) 2,3 kW c) 3,9 kg
21. a) 6,7 km^2 b) 36 min
22. d) 30 mA
23. a) 1,3 Ω b) 60 kΩ
24. b) −2,5 V c) 4,0 V
26. a) 440 Ω, 660 Ω, 4,2 mA b) 12 mW
28. a) 1)

29. a) $3{,}0 \cdot 10^{-7}$ C
b) $1{,}9 \cdot 10^{12}$ kpl kummastakin
30. 1) kyllä, 2) kyllä, 3) eivät
31. $E_P = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qd}{r^3}$, $W_{PA} = 0$ J
32. 50 cm varauksesta Q_1
33. a) 70 V, 2,3 kV/m kohti alempaa potentiaalia b) $-5{,}4$ μJ
34. a) 1) 0 J, 2) -14 μJ, 3) $-4{,}8$ μJ
b) 0 V, 12 V, 4,0 V
35. 0,0 mm − 1,0 mm: $V(x) = 1{,}0\ \frac{\text{kV}}{\text{mm}} \cdot x$,
1,0mm−2,0mm: $V(x) = -0{,}50\ \frac{\text{kV}}{\text{mm}}\, x + 1{,}5$ kV
36. $\pm 0{,}43$ μC
37. 9,2 kV
38. b) 28 mm c) 16 Mm/s, 48°
39. 0,11 Mm/s
40. b) 0,1 nN, hylkivä
43. b) 0,93 μF c) 1,6 kΩ
44. $-0{,}14$ μC siirtyy 9,0 nF kondensaattorista
45. a) 3,5 μF b) 63 V, 0,26 mC
46. a) 44μF b) 10 V c) 16 V

Hakemisto

akku 22
akseptori 160
alkeisvaraus 79
ampeerimittari 14

Coulombin laki 82, 83
Coulombin voima 83

diodi 156
dipoli 122
donori 160

energiavyö 165
eriste 83, 118, 122, 123
estosuunta 157, 163

Faradayn häkki 119

johde 118, 121
johtavuusvyö 165
Joulen laki 52, 67
jännite 20, 21, 31, 103
jännitehäviö 20
jännitelähde 21, 58

kapasitanssi 131, 135, 144
katodisädeputki 114
kenttäviivat 89, 90
Kirchhoffin 1. laki 15, 67
Kirchhoffin 2. laki 31, 67
kokonaiskapasitanssi 144
kokonaisresistanssi 44
kondensaattori 130
kondensaattorin
  energia 141
korvaava konden-
  saattori 144
kuormituskäyrä 57
kynnysjännite 157, 162
kytkentäkaavio 10

LED 156, 164
levykondensaattori 130, 135
lähdejännite 20
lämpöpari 23

maadoitus 30
mikropiiri 156

napajännite 20, 58
nollapotentiaali 102

Ohmin laki 25, 67
oikosulkuvirta 57

paristo 22, 56
polarisoituminen 122
potentiaali 30, 31, 101
potentiaalienergia 100
potentiaalikäyrä 31
puolijohde 118, 155
  n-tyypin 160
  p-tyypin 161
päästösuunta 157, 163

rekombinaatio 162
resistanssi 25, 37
resistiivisyyden lämpötila-
  kerroin 39
resistiivisyys 37
rinnankytkentä
  jännitelähteiden 63
  kondensaattorien 145
  vastusten 46

sarjakytkentä
  jännitelähteiden 63
  kondensaattorien 146
  vastusten 44
suhteellinen permittii-
  visyys 83, 123
sähköinen influenssi 120
sähköinen vuoro-
  vaikutus 78, 82, 112
sähkökenttä 88, 89
  homogeeninen 99, 100,
  103, 109, 112
  kenttäviivat 89, 90
  pistevarauksen 93
  potentiaali 101
  voimakkuus 91
sähköteho 52
sähkövakio 82
sähkövarauksen säilymis-
  laki 80
sähkövaraus 78, 80
sähkövirran suunta 13
sähkövirta 13, 14, 17

tasajännite 20
tasapotentiaalipinta 102
tasavirta 14
testivaraus 91
transistori 156, 167
työperiaate 112

vaihtovirta 14
valenssivyö 165
vapaa elektroni 16
varaustiheys 119
vastus 25, 43
virtapiiri 11
Voltan pari 22

Valokuvat

s. 7	Getty/Steven Puetzer
s. 8 vas.	SKOY/SPL
s. 8 oik.	SKOY/SPL
s. 9 ylh.	SKOY/Corbis/David Wrobel
s. 9 alh.	SKOY/SPL
s. 10 vas.	SKOY/SPL/Adam Hart-Davis
s. 10 oik.	iStockphoto
s. 11 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 11 kesk.	Sampsa Kaijaluoto
s. 11 oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 12 vas.	SKOY/SPL
s. 12 oik.	SKOY/PR/Charles D. Winters
s. 14 vas. ylh.	iStockphoto
s. 14 kesk. ylh.	iStockphoto
s. 14 oik. ylh.	iStockphoto
s. 14 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 15	Arsi Ikäheimonen
s. 17	iStockphoto
s. 18	Arsi Ikäheimonen
s. 19 ylh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 19 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 20 vas.	iStockphoto
s. 20 oik.	iStockphoto
s. 21	Sampsa Kaijaluoto
s. 22 vas. ylh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 22 oik. ylh.	Arsi Ikäheimonen
s. 22 alh.	iStockphoto
s. 23	Sampsa Kaijaluoto
s. 24	Sampsa Kaijaluoto
s. 26 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 26 oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 27	iStockphoto
s. 33	Arsi Ikäheimonen
s. 35	iStockphoto
s. 36 ylh.	Arsi Ikäheimonen
s. 36 alh.	iStockphoto
s. 38 ylh.	iStockphoto
s. 38 vas. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 38 oik. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 39 ylh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 39 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 41	Sampsa Kaijaluoto
s. 42	SKOY/SPL/Steve Gschmeissner
s. 43 vas.	iStockphoto
s. 43 oik.	iStockphoto
s. 44	Sampsa Kaijaluoto
s. 45	Sampsa Kaijaluoto
s. 46	iStockphoto
s. 51 vas.	iStockphoto
s. 51 oik.	iStockphoto
s. 52	Gorilla/Jan Djenner
s. 56	Arsi Ikäheimonen
s. 58 vas.	Arsi Ikäheimonen
s. 58 oik.	Arsi Ikäheimonen
s. 62 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 62 oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 65	Sampsa Kaijaluoto
s. 75	SKOY/Corbis/Ingo Beddenberg
s. 76 vas.	iStockphoto
s. 76 kesk.	iStockphoto
s. 76 oik.	Kuvaario/Ursa/Pekka Parviainen
s. 77 vas. ylh.	iStockphoto
s. 77 oik. ylh.	iStockphoto
s. 77 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 79	Sampsa Kaijaluoto
s. 80	Sampsa Kaijaluoto
s. 81	Sampsa Kaijaluoto
s. 82	Sampsa Kaijaluoto
s. 88 vas. ylh.	iStockphoto
s. 88 oik. ylh.	iStockphoto
s. 88 kesk.	Sampsa Kaijaluoto
s. 88 alh.	Arsi Ikäheimonen
s. 90 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 90 kesk.	Sampsa Kaijaluoto
s. 90 oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 92	Sampsa Kaijaluoto
s. 94	iStockphoto
s. 99 ylh.	Arsi Ikäheimonen
s. 99 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 102	Sampsa Kaijaluoto
s. 105	SKOY/SPL/Gustoimages
s. 112	Raimo Havukainen
s. 114	SKOY/PR/Charles D. Winters
s. 117	Sampsa Kaijaluoto
s. 118 vas.	iStockphoto
s. 118 oik.	Raimo Havukainen
s. 119 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 119 oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 120 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 120 oik.	iStockphoto
s. 121 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 121 oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 124	Sampsa Kaijaluoto
s. 127	iStockphoto
s. 128 vas.	iStockphoto
s. 128 kesk.	iStockphoto
s. 128 oik.	iStockphoto
s. 129 vas. ylh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 129 oik. ylh.	iStockphoto
s. 129 alh.	Arsi Ikäheimonen
s. 132 ylh.	Arsi Ikäheimonen
s. 132 alh.	SKOY/SPL/Motta & Naguro
s. 134 ylh.	Is-Vet Oy
s. 134 vas. alh.	Arsi Ikäheimonen
s. 134 kesk. alh.	Arsi Ikäheimonen
s. 134 oik. alh.	Arsi Ikäheimonen
s. 136 vas.	SKOY/SPL/Andrew Lambert
s. 136 oik.	Fermilab
s. 139	iStockphoto
s. 140	iStockphoto
s. 141 vas.	iStockphoto
s. 141 oik.	iStockphoto
s. 142	iStockphoto
s. 143	iStockphoto
s. 144	Sampsa Kaijaluoto
s. 145	Sampsa Kaijaluoto
s. 153	iStockphoto
s. 154 vas. ylh.	iStockphoto
s. 154 oik. ylh.	NASA
s. 154 alh.	LK/Aftonbladet Bild/ Lasse Allard
s. 155 vas.	iStockphoto
s. 155 oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 156 vas. ylh.	iStockphoto
s. 156 kesk. ylh.	iStockphoto
s. 156 oik. ylh.	iStockphoto
s. 156 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 157 vas.	iStockphoto
s. 157 oik.	iStockphoto
s. 158 vas.	Teemu Luoma
s. 158 oik.	iStockphoto
s. 159 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 159 kesk.	Sampsa Kaijaluoto
s. 159 oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 162	iStockphoto
s. 164 vas.	iStockphoto
s. 164 oik.	SKOY/Corbis/NASA
s. 165 vas.	UCSB/Randy Lamb
s. 165 oik.	SKOY/PR/Giphotostock
s. 166	SKOY/Corbis/ Smithsonian Institution
s. 167	iStockphoto
s. 173	Arsi Ikäheimonen